



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사학위논문

기후변화 불확실성 하의 용수공급계획을 위한
로버스트 의사결정의 적용성 검토

Testing Applicability of Robust Decision Making
for a Water Supply Planning Under Climate
Change Uncertainty

2012년 8월

서울대학교 대학원

건설환경공학부

강 노 을

초 록

기후변화 대응은 온실가스 배출의 감축 및 흡수원을 확대하는 완화(mitigation)와 기후변화로 인한 영향과 취약성을 평가해 피해를 최소화하는 적응(adaptation)이 상호 균형을 이루어야 한다. 지금까지 우리나라를 포함한 국제사회는 대부분 완화를 위해 노력해 왔지만 최근에 들어 완화만으로는 기후변화의 영향을 회피하기 어렵다는 사실이 인식되면서 적응 연구가 다양하게 이루어지고 있다. 이러한 상황 가운데 적응 계획의 실현화를 위해서 기후변화의 불확실성을 고려한 의사결정에 관한 연구는 반드시 뒷받침 되어야 한다.

기존의 일반적인 의사결정은 다양한 미래 시나리오들 하에 가장 높은 효용을 가져오는 최적(optimal)의 대안을 채택하는 고전적 결정분석(classical decision analysis)의 프레임을 사용하였다. 그러나 기후변화로 인해 미래 상태의 확률에 대한 정보의 부족으로 최적의 대안을 선정하는 것에 대한 의문이 제기되며 새로운 기법에 대한 연구가 이루어지고 있다.

본 연구는 기후변화의 불확실성을 고려하기 위한 새로운 의사결정 기법인 로버스트 의사결정(Robust Decision Making)을 실제유역의 적용을 통해 제안하고자 한다. 로버스트 의사결정은 장기적 정책 결정 및 분석을 위한 국제 비영리 기관인 RAND corporation에서 개발한 것으로 최적의 대안을 채택하는 것 대신 모든 가능한 시나리오 가운데 가장 둔감한(insensitive) 혹은 안정적인 전략을 채택한다는 것에서 기존의 의사결정 기법과 차이가 있다.

연구의 적용은 안동댐과 임하댐 유역을 대상으로 하였으며, 온실 가스 배출 시나리오 A1B, A2, B1시나리오에 대해 12개의 GCMs에서 산출된 기후자료를 기반으로 25개의 미래 기상시나리오를 작성하였다. 대안은 안동댐과 임하댐의 수위를 조정함으로써 유효저수용량이 증진될 수 있도록

록 하였으며, 이수기와 홍수기 측면에서 저수지 운영 능력의 향상을 분석하였고 최종적으로 대안의 순위를 도출하였다. 연구 결과, 최적 의사결정과 로버스트 의사결정 사이에는 6개 대안을 기준으로 평균 순위차가 0.33 ~ 1.33으로 나타났다.

본 연구는 사례 적용 후 더 나아가 기후변화와 같이 미래 상태에 대한 확률의 정보가 부족한 상태에서 몇 개의 시나리오를 선택해야 할 경우, 로버스트 의사결정과 최적 의사결정 중 어느 방법이 어떤 시나리오를 선택하느냐에 따른 영향을 덜 받는지 다양한 case를 생성하여 그 변동성을 측정하였다. 그 결과 로버스트 의사결정이 최적 의사결정보다 시나리오 선택에 의한 순위 변동이 작은 것으로 평가되었다. 이는 기후변화와 같이 시나리오 가능성(likelihood)에 대한 정보가 부족한 상황 하에 몇 개의 시나리오를 선택해야 할 때 로버스트 의사결정으로 대안의 순위를 산정하는 것이 최적 의사결정으로 산정한 것보다 다른 종류의 시나리오를 선택했을 때 예상되는 순위의 변동 폭이 상대적으로 작다는 것을 의미한다. 이러한 결과는 기후변화의 상황에서 시나리오에 부여된 확률을 기반으로 하고 있는 최적 의사결정보다 로버스트 의사결정이 더 적합하다는 것을 뒷받침해주고 있다.

본 논문은 기후변화 하의 로버스트 의사결정의 효과를 분석하기 위한 기초 연구로 향후 어떠한 상황에서 로버스트 의사결정이 더 우수하게 작용하는 지 좀 더 면밀히 연구해야 할 것이다. 더 나아가 시나리오의 선택 뿐 아니라 불확실성의 크기에 따라 로버스트 의사결정의 결과는 최적 의사결정과 비교하여 어떻게 달라지는지 연구해 보아야 할 사항이다.

주요어: 기후변화 적용, 로버스트 의사결정, 불확실성, 수자원계획
학 번: 2010-23301

목 차

초 록	i
목 차	iii
표 목차	v
그림 목차	vii
기 호	xi
제 1 장 서론	1
1.1 연구배경 및 필요성	1
1.2 연구의 목적	4
1.3 논문의 구성	4
제 2 장 연구 동향	6
2.1 기후변화 적응	6
2.2 기후변화와 수자원계획의 의사결정	9
제 3 장 이론적 배경	16
3.1 기후변화와 불확실성	16
3.1.1 기후변화의 특성	16
3.1.2 기후변화의 불확실성 유형	17
3.2 의사결정 기법(Decision analysis)	20
3.2.1 최적 의사결정(Optimal Decision Making)	21
3.2.2 로버스트 의사결정(Robust Decision Making)	24
3.3 기후변화 영향평가	27
3.3.1 배출 시나리오와 GCM 및 상세화 기법	27
3.3.2 물수지 모형	31
3.4 대안 설정 및 저수지 운영 평가	34
3.4.1 대안 설정	34
3.4.2 저수지 운영 모형 및 평가	36

제 4 장 기후변화 시나리오 별 저수지 운영 평가	38
4.1 대상 유역 및 댐 현황	38
4.2 기상 및 유량 시나리오 작성	43
4.2.1 배출시나리오와 GCM 선정 및 상세화	43
4.2.2 유량 시나리오 모의	57
4.3 저수지 운영 능력 평가	71
4.3.1 성능인자(performance index) 설정	71
4.3.2 시나리오 별 댐 방류량 모의	72
4.3.3 시나리오 별 성능인자 산정	83
제 5 장 최적 및 로버스트 의사결정의 적용	90
5.1 대안 설정 및 평가	90
5.1.1 대안설정	90
5.1.2 시나리오-대안 별 성능인자 산정	92
5.2 의사결정 기법의 적용	99
5.2.1 관측 시나리오	99
5.2.2 최적 의사결정	104
5.2.3 로버스트 의사결정	105
5.2.4 대안 순위 비교분석	118
제 6 장 로버스트 의사결정의 효과	124
6.1 기후변화 시나리오와 의사결정	124
6.2 기후변화 시나리오 선택 case 별 대안 평가	125
6.2.1 시나리오 선택의 case 생성	125
6.2.2 대안 순위 및 변동성 평가	127
제 7 장 결론 및 향후연구	137
7.1 요약 및 결론	137
7.2 고찰 및 향후연구	138
참 고 문 헌	140
Abstract	148

표 목차

Table 2.1 Decision analysis framework (Toth, 2000) (<i>continued</i>)	11
Table 2.1 Decision analysis framework (Toth, 2000)	12
Table 2.2 Literature review for water resources planning (<i>continued</i>)	14
Table 2.2 Literature review for water resources planning	15
Table 3.1 GCMs for IPCC AR4 reports	30
Table 4.1 Global climate models from IPCC AR4 incorporated into the LARS-WG stochastic weather generator version 5.0. (Semenov et al., 2010)	44
Table 4.2 Selected emission scenarios and GCMs	45
Table 4.3 Stations for Andongdam and Imhadam and Thissen coefficient (Park, 2011)	46
Table 4.4 Monthly average accumulated precipitation in Andongdam and Imhadam basins for future period	56
Table 4.5 Parameters of <i>abcd</i> model (Park, 2012)	59
Table 4.6 Monthly average inflow in Andongdam and Imhadam basins for future period	69
Table 4.7 Performance index for scenarios	73
Table 4.8 Water level data in Andongdam and Imhadam	73
Table 4.9 Planned water supply in Andongdam and Imhadam (Working reference for dam operation, 2009)	74
Table 4.10 Annual average accumulated amount of water supply (Observed: 1986 ~ 2010 (AD), 1992 ~ 2010 (IH); Future: 2011 ~ 2100) ...	86
Table 4.11 Average reliability of water supply (Observed: 1986 ~ 2010 (AD), 1992 ~ 2010 (IH); Future: 2011 ~ 2100)	87
Table 4.12 Annual average accumulated amount of spill (Observed: 1986 ~ 2010 (AD), 1992 ~ 2010 (IH); Future: 2011 ~ 2100)	88
Table 4.13 Average reliability of non-spill (Observed: 1986 ~ 2010 (AD), 1992 ~ 2010 (IH); Future: 2011 ~ 2100)	89
Table 5.1 Alternatives for a reservoir operation	91
Table 5.2 Performance index for alternatives	93
Table 5.3 Amount of water supply in alternatives (SCN1 ~ SCN25)	96

Table 5.4 Reliability of water supply' in alternatives (SCN1 ~ SCN25)	97
Table 5.5 Amount of spill in alternatives (SCN1 ~ SCN25)	100
Table 5.6 Reliability of non-spill in alternatives (SCN1 ~ SCN25)	101
Table 5.7 Estimation alternatives in performance indices in observed scenario	103
Table 5.8 Estimation expected value and ranks in performance indices with ODM	106
Table 5.9 Regret of amount of water supply in alternatives and ranks (SCN1 ~ SCN25)	110
Table 5.10 Regret of reliability of water supply in alternatives and ranks (SCN1 ~ SCN25)	111
Table 5.11 Regret of amount of spill in alternatives and ranks (SCN1 ~ SCN25)	113
Table 5.12 Regret of reliability of non-spill in alternatives and ranks (SCN1 ~ SCN25)	114
Table 5.13 Estimation regret and ranks in performance indices with RDM	116
Table 5.14 Estimation ranks in performance indices with ODM, RDM and observed scenario	120
Table 5.15 Differences of ranks in performance indices between ODM and RDM	123
Table 6.1 Number of possible cases by selecting n scenarios in 25 scenarios	128

그림 목차

Figure 1.1 Relationship between mitigation and adaptation (UNFCCC, 2006)	2
Figure 2.1 “Top-down” and “bottom-up” approaches used to inform adaptation to climate change (Dessai, 2004)	8
Figure 3.1 Classification of uncertainties and responses (UKCIP, 2003)	19
Figure 3.2 Process of optimal decision making (WCUA, 2010)	23
Figure 3.3 RDM flowchart	25
Figure 3.4 SRES scenarios	28
Figure 3.5 Conceptual diagram of water balance model	32
Figure 3.6 Flowchart of <i>abcd</i> model (Hwang, 2005)	35
Figure 3.7 Distribution of a reservoir capacity	37
Figure 4.1 Research flow chart	39
Figure 4.2 Andongdam basin map	40
Figure 4.3 Imhadam basin map	42
Figure 4.4 Monthly accumulated precipitation in Andongdam basin (Observed scenarios, 1986.1 ~ 2010.12)	48
Figure 4.5 Monthly accumulated precipitation in Imhadam basin (Observed scenarios, 1992.1 ~ 2010.12)	49
Figure 4.6 Monthly accumulated precipitation in Andongdam basin (SCN1 ~ SCN25, 2011.1 ~ 2040.12)	50
Figure 4.7 Monthly accumulated precipitation in Andongdam basin (SCN1 ~ SCN25, 2041.1 ~ 2070.12)	51
Figure 4.8 Monthly accumulated precipitation in Andongdam basin (SCN1 ~ SCN25, 2071.1 ~ 2100.12)	52
Figure 4.9 Monthly accumulated precipitation in Imhadam basin (SCN1 ~ SCN25, 2011.1 ~ 2040.12)	53
Figure 4.10 Monthly accumulated precipitation in Imhadam basin (SCN1 ~ SCN25, 2041.1 ~ 2070.12)	54
Figure 4.11 Monthly accumulated precipitation in Imhadam basin (SCN1 ~ SCN25, 2071.1 ~ 2100.12)	55

Figure 4.12 Monthly average accumulated precipitation in Andongdam and Imhadam for future period (SCN1 ~ SCN25, 2011.1 ~ 2100.12))	58
Figure 4.13 Monthly inflow in Andongdam (Observed scenario, 1986.1 ~ 2010.12)	60
Figure 4.14 Monthly inflow in Imhadam (Observed scenario, 1992.1 ~ 2010.12)	61
Figure 4.15 Monthly inflow in Andongdam (SCN1 ~ SCN25, 2011.1 ~ 2040.12)	62
Figure 4.16 Monthly inflow in Andongdam (SCN1 ~ SCN25, 2041.1 ~ 2070.12)	63
Figure 4.17 Monthly inflow in Andongdam (SCN1 ~ SCN25, 2071.1 ~ 2100.12)	64
Figure 4.18 Monthly inflow in Imhadam (SCN1 ~ SCN25, 2011.1 ~ 2040.12)	65
Figure 4.19 Monthly inflow in Imhadam (SCN1 ~ SCN25, 2041.1 ~ 2070.12)	66
Figure 4.20 Monthly in Imhadam (SCN1 ~ SCN25, 2071.1 ~ 2100.12)	67
Figure 4.21 Average monthly inflow in Andongdam and Imhadam for future period (SCN1 ~ SCN25, 2011.1 ~ 2100.12)	70
Figure 4.22 Daily dam release in Andongdam (Observed scenario, 1986.1.1 ~ 2010.12.31)	75
Figure 4.23 Daily dam release in Imhadam (Observed scenario, 1992.1.1 ~ 2010.12.31.)	76
Figure 4.24 Daily dam release in Andongdam (SCN1 ~ SCN25, 2011.1.1 ~ 2040.12.31)	77
Figure 4.25 Daily dam release in Andongdam (SCN1 ~ SCN25, 2041.1.1 ~ 2070.12.31)	78
Figure 4.26 Daily dam release in Andongdam (SCN1 ~ SCN25, 2071.1.1 ~ 2100.12.31)	79
Figure 4.27 Daily dam release in Imhadam (SCN1 ~ SCN25, 2011.1.1 ~ 2040.12.31)	80
Figure 4.28 Daily dam release in Imhadam (SCN1 ~ SCN25, 2041.1.1 ~ 2070.12.31)	81

Figure 4.29 Daily dam release in Imhadam (SCN1 ~ SCN25, 2071.1.1 ~ 2100.12.31)	82
Figure 5.1 Amount of water supply in alternatives (SCN1 ~ SCN25)	98
Figure 5.2 Reliability of water supply in alternatives (SCN1 ~ SCN25)	98
Figure 5.3 Amount of spill in alternatives (SCN1 ~ SCN25)	102
Figure 5.4 Reliability of non-spill in alternatives (SCN1 ~ SCN25)	102
Figure 5.5 Ranks of alternatives in performance indices with ODM	107
Figure 5.6 Regret of amount of water supply in alternatives (SCN1 ~ SCN25)	112
Figure 5.7 Regret of reliability of water supply in alternatives (SCN1 ~ SCN25)	112
Figure 5.8 Regret of amount of spill in alternatives (SCN1 ~ SCN25)	115
Figure 5.9 Regret of reliability of non-spill in alternatives (SCN1 ~ SCN25)	115
Figure 5.10 Ranks of alternatives with RDM	117
Figure 5.11 Ranks of alternatives in amount of water supply (ODM vs. RDM vs. Observed scenario)	121
Figure 5.12 Ranks of alternatives in reliability of water supply (ODM vs. RDM vs. Observed scenario)	121
Figure 5.13 Ranks of alternatives in amount of spill (ODM vs. RDM vs. Observed scenario)	122
Figure 5.14 Ranks of alternatives in reliability of non-spill (ODM vs. RDM vs. Observed scenario)	122
Figure 5.15 Average differences of ranks in performance indices between ODM and RDM	123
Figure 6.1 Research flowchart for analysis of effectiveness for ODM and RDM in selecting scenarios	126
Figure 6.2 Ranks about PA1 with ODM in CASE1000 ~ CASE1050 when selecting 5 scenarios in 25 scenarios	129
Figure 6.3 Ranks about PA1 with RDM in CASE1000 ~ CASE1050 when selecting 5 scenarios in 25 scenarios	129
Figure 6.4 Ranks about PA1 with ODM in CASE1000 ~ CASE1050 when selecting 10 scenarios in 25 scenarios	130

Figure 6.5 Ranks about PA1 with RDM in CASE1000 ~ CASE1050 when selecting 10 scenarios in 25 scenarios	130
Figure 6.6 Ranks about PA1 with ODM in CASE1000 ~ CASE1050 when selecting 15 scenarios in 25 scenarios	131
Figure 6.7 Ranks about PA1 with RDM in CASE1000 ~ CASE1050 when selecting 15 scenarios in 25 scenarios	131
Figure 6.8 Ranks about PA1 with ODM in CASE1000 ~ CASE1050 when selecting 20 scenarios in 25 scenarios	132
Figure 6.9 Ranks about PA1 with RDM in CASE1000 ~ CASE1050 when selecting 20 scenarios in 25 scenarios	132
Figure 6.10 Standard deviation of ranks in cases when selecting 5 scenarios in 25 scenarios	135
Figure 6.11 Standard deviation of ranks in cases when selecting 10 scenarios in 25 scenarios	135
Figure 6.12 Standard deviation of ranks in cases when selecting 15 scenarios in 25 scenarios	136
Figure 6.13 Standard deviation of ranks in cases when selecting 20 scenarios in 25 scenarios	136

기 호

Latin Uppercase

A'	모든 대안(all alternatives)
A_i	i 번째 대안(i_{th} alternative)
B_n	n 년도의(benefit in n year)
C_j	j 번째 시나리오 선택 case(case of j_{th} scenarios selection)
C_n	n 년도의 비용(cost in n year)
$EV(A_i)$	i 번째 대안의 기댓값(expected value of i_{th} alternative)
G_t	t 월 말의 지하수량(groundwater storage at the end of month t)
NB_t	t 년도의 순(net-benefit in t year)
NPV	순현재가(net present value)
$P(S_j)$	j 번째 시나리오의 확률(probability of j_{th} scenario)
$Performance(A_i, S_j)$	j 번째 시나리오에서 i 번째 대안의 성능인자(a performance index in j_{th} scenario and i_{th} alternative)
$Performance' (A_i, S_j)$	j 번째 시나리오에서 i 번째 대안의 성능인자의 대안 효과(effectiveness of a performance index in j_{th} scenario and i_{th} alternative)
PE_t	t 월 동안의 잠재증발산량(potential evapotranspiration during month t)
Pr	확률(probability)
P_t	t 월 동안의 강수(precipitation during month t)
$Regret(A_i, S_j)$	j 번째 시나리오에서 i 번째 대안의 후회도(regret in j_{th} scenario and i_{th} alternative)
R_m	순위의 평균(mean of ranks)
R_t	t 월 동안의 유출량(runoff during month t)
S'	모든 시나리오(all scenarios)
S_j	j 번째 시나리오(j_{th} scenario)
S_t	t 월 말의 토양 수분량(soil moisture storage at the end of month t)
X_t	t 월 동안의 여수로 방류량(dam release in t month)
W_t	t 월 동안의 가용수량(available water during month)
Y_t	t 월 동안의 기회증발산량(evapotranspiration opportunity during month t)

Latin Lowercase

a	Propensity of runoff to occur before the soil is fully saturated
b	Upper limit on the sum of evapotranspiration and soil moisture storage
c	Fraction of mean runoff that comes from groundwater
d	Reciprocal of the groundwater residence time
m	전체 대안의 개수(the number of total alternatives)
r	할인율(discount ratio)
t	월(month)

Greek Lowercase

ρ	신뢰도(reliability)
σ_R	순위의 표준편차(standard deviation of ranks)

제 1 장 서론

1.1 연구배경 및 필요성

최근 21세기에 들어서면서 지구온난화로 인하여 기후변화는 갈수록 강도 높은 가뭄과 홍수, 태풍을 일으키고 있다. 이로 인한 피해와 손실은 국가 위기관리 차원의 주요 이슈로 등장하게 되었고 이에 대한 대비책이 현재 시급해지고 있다.

기후변화 대응을 위한 방안은 Figure 1.1과 같이 크게 두 가지로 나누어진다. 하나는 지구온난화의 주원인인 온실가스의 배출을 줄이거나 온실가스 흡수원을 확보함으로써 기후변화가 더 이상 진행되지 않도록 막는 완화(mitigation)적 측면의 정책이고, 다른 하나는 현재 나타나고 있거나 미래에 전망되는 기후변화로 인한 사회경제나 자연 시스템이 받는 파급효과와 영향을 파악하여 예상되는 영향을 최소화하거나 긍정적인 영향의 기회로 활용하는 적응(adaptation)적 측면의 정책이다(IPCC, 2007). 기후변화에 대응하기 위해서는 이러한 두 측면이 상호 균형을 이루며 진행되어야 한다. 그러나 지금까지 국제사회나 각 국가에서 논의되고 노력한 것은 온실가스 완화에만 집중되었고 우리나라도 마찬가지로 기후변화의 영향과 취약성을 최소화하려는 적응적 측면의 노력보다는 온실가스 배출 자체를 줄이는데 집중해왔다. 하지만 최근 들어 기후변화 완화만으로는 과거 배출로 인해 이미 나타나는 기후변화에 의한 영향을 피하기 어렵다는 사실이 인식되면서 현재의 상황을 토대로 미래의 변화를 전망하고 영향을 감소시키기 위한 적절한 계획, 즉 적응 측면의 노력이 요구되고 있는 실정이다(한화진, 2006; 2007).

본격적으로 국제사회에서 기후변화의 적응에 대해서 논의되기 시작한 시점은 2001년에 발간된 IPCC 제 3차 보고서 이후이다. 초창기 적응에 관한 논의는 상대적으로 기후변화의 영향에 취약한 개발도상국을 중심으

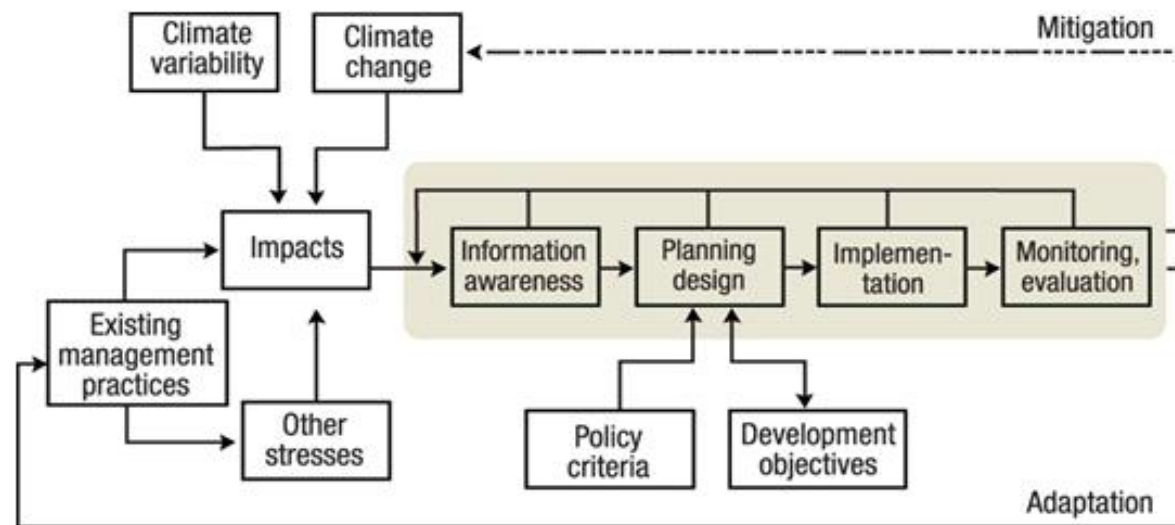


Figure 1.1 Relationship between mitigation and adaptation (UNFCCC, 2006)

로 이루어졌다. 그러나 기후변화로 인한 피해가 지역에 상관없이 선진국을 포함하여 전 지구적으로 확산됨에 따라 적응에 대한 관심은 국제적인 이슈가 되었다. 기후변화협약 당사국총회(12th meeting of the Conference of the Parties)에서는 2006년에 기후변화 영향과 적응 조치에 대한 나이로비 5개년 작업프로그램을 채택하여 적응을 지구적 주요 현안으로 삼기 시작했다. 우리나라는 2008년 ‘저탄소 녹색성장’을 국정기초로 선언한 이후 녹색산업과 기술개발을 위해 온실가스 감축에 주로 집중했던 정책적 관심을 재해예방과 관리 등의 적응적 측면으로 옮겨가기 시작했다(고재경 등, 2008).

기후변화의 적응에 관한 중요성에 대한 인식이 국내외적으로 증대됨에도 불구하고 수자원 부문에서는 아직 기후변화 전망과 영향에 대한 연구에 머물러 있을 뿐 적응조치나 정책과의 연계는 추진되지 못하고 있다. 그 이유는 현재까지 이루어진 대부분의 연구가 기후변화로 인한 취약성 분석에 머물러 있고 실재 수자원계획 수립에 반영시킬 수 있는 ‘의사결정(decision making)’에 관한 연구가 이루어지고 있지 않기 때문이다. 의사결정이란 과학경영(operations research)에서 주로 사용하는 개념으로 주어진 상황에 따라 복잡하거나 선택 가능한 대안들을 평가하고 최선의 대안을 선택하는 일련의 과정을 말한다(이홍배 등, 2000). 최근 들어서 선진국은 기후변화를 고려한 수자원 전략을 구축하기 위해 의사지원계획 방법(decision-support planning method)에 대한 연구를 활발하게 진행하고 있다. 그러나 우리나라의 경우 의사결정 기법을 수자원계획에 적용하는 것에 대해서도 아직 초기단계이고 기후변화를 고려한 의사결정 기법에 관한 연구는 거의 부재한 상태에 있다.

이러한 배경 하에 본 논문은 기후변화 적응 전략 수립을 위하여 기후변화의 가장 큰 특성인 ‘불확실성(uncertainty)’에 초점을 맞추어 수자원계획의 의사결정 기법에 관하여 논의하였다. 본 연구가 기후변화를 반영하여 국내의 수자원 계획을 세우기 위한 의사결정에 관한 기초 연구가 될 수 있을 것으로 기대한다.

1.2 연구의 목적

본 연구의 목적은 기후변화의 불확실성을 고려한 의사결정 기법 (decision analysis)인 ‘로버스트 의사결정(Robust Decision Making, RDM)’을 제안하고 댐 용수공급계획에 시범적으로 적용함으로써 기존의 일반적인 의사결정 기법인 ‘최적 의사결정(Optimal Decision Making, ODM)’과의 결과를 비교하여 로버스트 의사결정의 효과를 분석하는 데에 있다. 첫째, 기후변화를 고려한 의사결정 기법에 연루되는 불확실성의 특성을 분석한다. UKCIP(2003)를 기반으로 불확실성의 유형을 조사한 후, 이를 기반으로 기후변화에 적합한 의사결정 기법으로서 로버스트 의사결정을 제시한다. 둘째, 실제 유역에 적용 함으로써 기존의 일반적 의사결정 기법인 최적 의사 결정과의 방법적 차이를 비교하고 그 결과를 분석한다. 셋째, 기후변화 시나리오 중 몇 개의 시나리오 채택할 시 선택의 case 별로 로버스트 의사결정과 최적 의사결정의 대안 별 순위의 변동성을 비교함으로써 기후변화 하의 로버스트 의사결정의 효과를 입증한다.

1.3 논문의 구성

제 2장에서는 연구동향으로 ‘기후변화 적응’과 ‘기후변화와 수자원 계획의 의사결정’에 대하여 살펴보았다. 이론적 배경인 제 3장에서는 첫 번째로 ‘기후변화의 불확실성과 의사결정’과 ‘의사결정 기법’을 통해 기후변화와 ‘최적 의사결정(Optimal Decision Making, ODM)’ 및 ‘로버스트 의사결정(Robust Decision Making, RDM)’ 기법에 관하여 논의했고, 두 번째로는 ‘기후변화 기상 및 유량 시나리오 작성’과 ‘대안 설정 및 저수지 운영 평가’를 통해 제 4장의 사례 작성을 위한 이론적 배경을 간략히 설명하였다. 제 4장에서는 의사결정 기법을 적용하기 위한 용수공급계획에

대한 사례로 안동댐과 임하댐 유역을 대상으로 다양한 기후변화 시나리오 별로 미래 댐 방류량을 모의하고 이수기와 홍수기의 저수지 운영 능력을 평가하였다. 제 5장에서는 안동댐과 임하댐의 수위를 가상으로 조정한 대안을 설정한 후 최적 및 로버스트 의사결정 기법을 적용하여 대안의 순위를 산정하고 그 결과를 비교하였다. 제 6장에서는 다양한 기후변화 시나리오 중 몇 개의 시나리오를 채택할 시 선택의 case에 따른 순위의 변동성을 최적 의사결정과 로버스트 의사결정에 의해 각각 산정하여 기후변화 상황 하의 로버스트 의사결정의 효과를 확인하였다. 마지막으로 7장에서는 본 연구의 결론 및 향후 연구에 대해서 서술하였다.

제 2 장 연구 동향

기후변화에 대한 수자원 연구는 1980년 대 이후 다양한 형태로 현재까지 급속히 진행되어 왔다. 그러나 대부분 타 분야의 기후변화 연구들과 마찬가지로 그동안 수자원 분야에서는 기후변화 전망에 의한 영향평가에만 대부분 치중되어 있었다. 최근 들어서 기후변화 적응이 강조되면서 국내외로 수자원 취약성에 관한 연구가 진행되고 있지만 실질적으로 적응전략 수립을 위한 연구는 매우 미비한 상태이다. 사실상 적응전략에 대한 중요성이 대두되면서 국내 여러 기관에서 연구의 필요성에 대하여 언급하고는 있지만 실질적인 연구는 해외사례 분석과 제언 정도에 머물러 있다. 실제적인 전략 수립을 위해서는 기후변화를 고려한 의사결정에 관한 연구가 필요할 것이다. 본 장에서는 ‘기후변화 적응’과 ‘기후변화와 수자원계획의 의사결정’ 두 부분으로 나누어 연구동향을 살펴보았다.

2.1 기후변화 적응

기후변화 적응에 관한 연구의 접근은 크게 예측 지향형(prediction oriented)과 복원력 지향형(resilience oriented)으로 나눌 수 있다(Dessai, 2005). 예측 지향형은 기후변화의 불확실성을 파악하고(characterized) 감소시키고(reduced) 관리하여(managed) 소통을(communicated) 도모하는 접근이다. 이러한 방식은 모형의 복잡성과 미래 기후와 그 영향을 예측하기 위한 기술의 증대를 가져온다. 예측 지향형의 개념은 결정 분석(decision analysis)와 리스크 분석(risk analysis) 연구로부터 기인하였다고 볼 수 있고, 복원력 지향형은 기후변화와 연루된 불확실성을 되돌릴 수 없는 것으로 수용하고 과거의 사상으로부터의 학습을 강조하는 개념으로 사회 및 정책 분야와 천연자원의 적응 관리, 복잡한 적응 시스템의 연구로부터 파생되었다고 본다. 다시 말해 예측 지향형은 미래에 대한

전망을 강조하는 반면 복원력 지향형은 예측이 불가능한 기습적(surprises) 미래를 가정하여 과거로부터의 학습을 강조한다. 이러한 맥락에서 Dessai and Hulme(2004)가 제시한 Figure 2.1의 하향식(top-down) 접근은 예측 지향형과 관련이 있고 상향식(bottom-up) 접근은 복원력 지향형과 관련이 있다. 사실상 이 두 가지 접근은 불확실성의 저감이나 수용과 같은 불확실성에 대한 태도의 차이를 포함하여 인식론, 분석 도구, 시간스케일, 계획 범위 및 국가나 지역의 개발 상태에 따라 그 선택이 달라질 수 있다(Dessai et al., 2004). 특히 시간 스케일의 경우는 불확실성의 관점에서 매우 중요하게 여겨지는데 그 이유는 앞으로 일 이십년에 대해서는 온실가스 배출에 거의 민감하지 않다고 볼 수도 있지만 다음의 일 세기까지는 그것을 알 수 없기 때문이다.

하향식 접근에는 1990년대 초에 IPCC에서 영향과 적응 평가를 위해 가이드라인으로 제시한 ‘IPCC approach’가 있다(Carter et al. 1994; Parry et al., 1998). 이 접근은 기본적으로 기후변화 시나리오에 의존하여 영향평가를 하는 방식이며 더 나아가 불확실성에 관련되어 있는 사회경제 시나리오까지 확장하기도 한다(Feenstra et al., 1998). 최근에는 지역적 기후 모델(Regional Climate Model)과 상세화 기법(downscaling)으로부터 개발된 시나리오가 사용되고 있다. 이러한 방식은 적응전략 구축 측면에서 볼 때 제공되는 예측 기후 정보가 매우 중요한 역할을 하게 된다. 그 외의 하향식 접근으로는 ‘risk approach’가 있는데, 이는 ‘IPCC approach’를 기반으로 기후변화 시나리오의 불확실성을 확률로 나타내어 평가한 방법이다. 사실 상 리스크 평가 및 관리는 새로운 개념이 아니라 다양한 환경 문제에 적용되어온 개념이다. Jones(2001)은 기후변화의 영향을 평가하기 위해 환경 분야의 리스크 평가와 관리 체계를 개발한 바가 있다. ‘risk approach’와 ‘IPCC approach’는 둘 다 미래의 불확실성을 기후변화의 시나리오로 다루었지만 ‘risk approach’는 ‘IPCC approach’와 달리 완전히 시나리오에 의존하지 않고 이해당사자(stakeholder)가 영향의 임계치를 정하도록 함으로써 이해당사자의 관여를 받는다는 차이점이

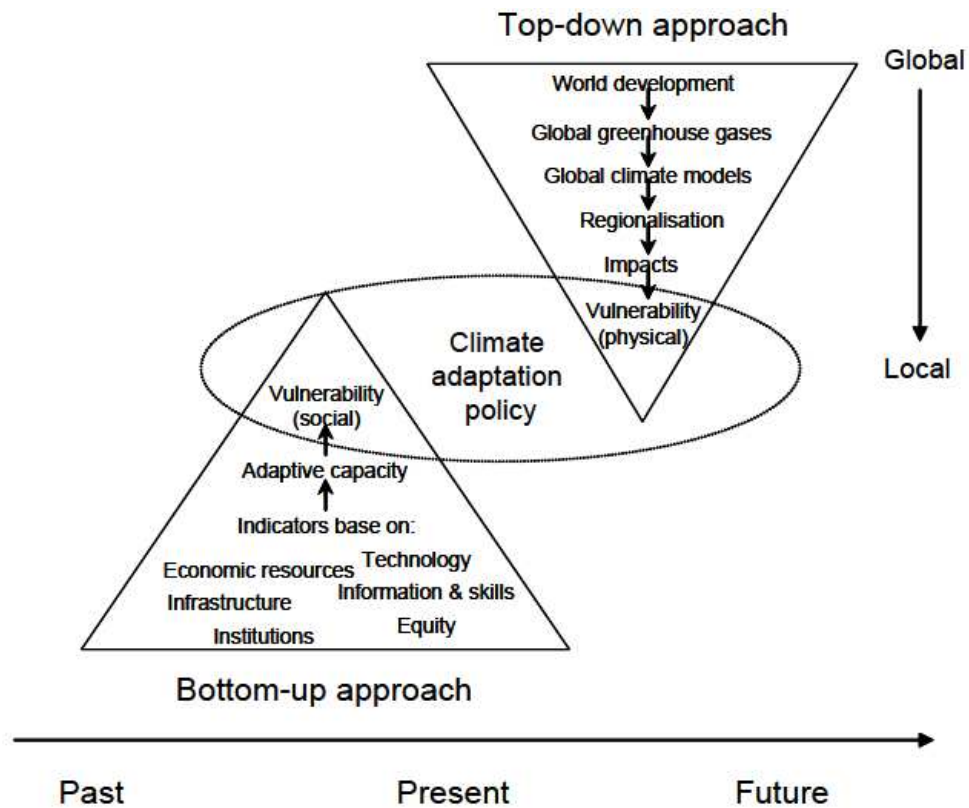


Figure 2.1 “Top-down” and “bottom-up” approaches used to inform adaptation to climate change (Dessai, 2004)

있다. 상향식 접근에는 현재의 상태를 토대로 미래를 설계하는 방식으로 안전 여유(safety margin) 설정, 복원도(resilience) 측정 및 예측 설계(anticipating design) 등의 기법이 있다.

하향식과 상향식 접근 외에는 전망된 미래 기후정보에 기초한 하향식 접근과 현재 상태에 기반한 상향식 접근이 조합된 복합식 접근(mixed approach)이 있다. 사실상 기후변화의 문제는 매우 복잡하고 국제적이어서 기후의 변수가 많으므로 전망된 다양한 기후 시나리오에 정확한 확률을 부여하기가 힘들다. 이러한 문제로 인해 복합식 방식은 미래 기후정보를 토대로 의사결정을 시행하되 주기적으로 상태를 관찰하여 대안 채택을 업데이트한다(Dessai and Hulme, 2004). 이러한 맥락에서 UKCIP(2003)는 의사결정자가 기후변화의 변동과 변화에 연관된 불확실성을 고려하여 적절한 적응 옵션을 파악하기 위한 체계를 개발한 바가 있다. RAND(2000)는 장기적인 정책을 결정하기 위한 기법으로 미래 다양한 정보에 부여된 확률의 불확실성에 대하여 안정적인 대안을 찾을 수 있는 로버스트 의사결정을 개발하였다.

2.2 기후변화와 수자원 계획의 의사결정

수자원 문제는 일반적으로 크게 계획(planning)과 관리(management) 단계로 나눌 수가 있다. 수자원계획은 수자원의 수급 상황의 분석을 통해 수량 및 수질과 경제성 등을 고려하여 수요를 충족시키도록 물을 확보하여 안정적으로 공급하고 만약 물이 부족할 시에는 여러 가지 대안을 파악하고 검토하여 적절한 전략을 수립한다(심명필, 2001a).

일반적으로 수자원 사업을 수행하기 위해서는 예비타당성 계획을 시행하는 데 대안들을 평가하고 최종 대안을 채택하는 의사결정을 위해서 보편적으로 경제성 분석이 사용된다. 유역종합치수계획에서는 치수능력을 증대하기 위해 다양한 대안들을 검토 및 분석하여 편익-비용비

(benefit-cost ratio)가 가장 큰 것을 대안으로 선정하였다(변성호 등, 2007). 경제성 분석은 몇 가지 방법으로 분류할 수 있는데, 첫 번째는 산정된 투자비용에 비해 이 가장 높은 즉 높은 회수율을 얻을 것으로 기대되는 것으로 결정하는 비용-편익 분석(cost-benefit analysis)이다. 비용-편익 분석은 순현재가(net present value), 편익-비용비, 내부수익률(Internal rate of return) 등의 기준 인자를 이용해 이루어진다. 사업이 국가 경제에 크게 관련되어 있지 않고 비용과 편익의 정량화가 가능하다면 이러한 방법은 경제적 결정의 타당한 기준을 제공한다. 비용-편익 분석은 편익을 정확하게 산정하기 어렵다는 점 때문에 기후변화 적응에 아직 많이 적용되지는 않고 있지만 꾸준히 개선되고 있는 실정이다(Metroeconomica, 2004). 두 번째 방법은 비용효과분석(cost effectiveness analysis)이다. 이 분석은 미리 결정된 목적 또는 목표를 취하는 최소비용을 조사하는 방법이다. 비용효과분석은 경제적 회수율이나 편익에 관련된 어떤 정보도 제공할 수 없으나 목적 또는 목표를 만족시키는 최저비용 방법을 확인할 수 있다. 이 기법은 비용-편익분석을 수행하는 것과 비교해 볼 때 최소비용의 해를 계산함으로써 인해 시간소비가 적고 비용이 거의 들지 않는다는 이점이 있다.

Toth(2000)는 기후변화 적응의 의사결정 대한 연구가 부족하다고 언급하며 의사결정체계(decision analysis framework)에 대한 검토를 시행하였다. 그는 ‘결정분석체계’란 의사결정자가 다양한 결정의 옵션들의 과정을 평가할 수 있도록 돕기 위해서 기후변화 문제들의 많은 요소들로부터 유용한 정보로 종합하기 위한 분석적 기술이라고 정의하였다. 이러한 결정분석체계의 도구는 다양한 형태로 기후변화 문제에 적용되어 왔는데 그 종류와 내용은 Table 2.1과 같다. 이러한 결정분석체계의 도구는 정책 전략을 선택하고 대안의 수행에 대한 이해와 여러 가지 인자들에 대한 상호작용 등의 일련의 과정에서 정책결정자의 이해를 돕는 역할을 한다. Table 2.1을 보면 앞서 설명한 수자원 계획의 실무에서도 보편적으로 사용되는 비용-편익분석과 비용효과분석이 있고 그 외에 게임이론

Table 2.1 Decision analysis framework (Toth, 2000) (*continued*)

Decision analysis frameworks	Description of the tool	Applicability to problem characteristics
Decision analysis	Decision analysis is a formal quantitative technique for identifying “best” choices from a range of alternatives. Decision analysis requires the development of explicit choices, possible outcomes, and outcome values. Uncertainty is incorporated directly in the analysis by assigning probabilities to individual outcomes.	G, L, H, U, IR
Cost-benefit analysis	Estimates of the costs and benefits for selected decision variables are derived. The “best” outcome is the one with the highest net benefits.	G, L, H, U, IR
Cost-effectiveness analysis	Accepts specific performance goals as given exogenously, then minimizes the cost to achieve the desired performance.	G, L, H, U, IR
Tolerable windows and/or safe landing approach	Accepts specific performance goals as inequalities given exogenously, then enumerates pats that are consistent with the goals	G, L, H, U, IR
Game theory	Provides information about the implication of multiple decision-makers’ choices, taking into account expectations that each has of their own actions on others, and others’ actions on them	G, IN
Notes: <i>G</i> = global; <i>H</i> = pervasive human activities; <i>U</i> = uncertainty; <i>IR</i> = irreversible; <i>IN</i> = relevant to institutional framing		

Table 2.1 Decision analysis framework (Toth, 2000)

Decision analysis frameworks	Description of the tool	Applicability to problem characteristics
Portfolio theory	Concerned with creating under a budget constraint an optimal composition of assets characterized by different returns and different levels of s. decision options (portfolio elements) are represented by a probability distribution of expected returns while s are estimated on the basis of the variability of expected returns, and only these two factors determine the decision makers' utility function. The decision rule is to choose the efficient portfolio compared to which no other portfolio offers higher expected return at the same or lower level of or lower with the same (or higher) expected return.	G, L, H, IN
Public finance theory	Encompasses a variety of research techniques including the theory of the second best.	IN
Ethical and cultural prescriptive rules	Concerned primarily with the implications of alternative social organizations. Has had limited application to the climate problem.	IN
Policy exercises, focus groups, and simulation gaming	Includes a suite of research activities that have been used to assist in the decision-making process. In general, groups examine potential outcomes by playing a role in a simulated decision-making environment.	G, IN
<i>Notes: G = global; H = pervasive human activities; U = uncertainty; IR = irreversible; IN = relevant to institutional framing</i>		

(game theory)과 포트폴리오 이론(portfolio theory) 등을 확인할 수 있다.

기후변화 및 불확실성을 고려한 의사결정에 관한 국내외 연구는 2000 년대에 이르러 시작되었다. 김영오와 서용원(2000)은 기후변화와 수자원 관리에 대한 연구사례를 서술하고 전 세계에 수행되고 있는 기후변화 연구 과업을 정리하였다. Dessai(2005)은 기후변화 불확실성에 대해서 안정적인(robust) 적응 전략을 찾는 평가체계를 제시하고 다양한 지역적 민감도 분석을 통해 계획을 위한 대안들이 다른 요소들에 민감한지 아닌 지를 결정하였다. Grove et al.(2007)은 기후변화의 미래 기상 시나리오를 이용하여 로버스트 의사결정(robust decision making) 기법을 제시하고 캘리포니아 장기적 수자원 계획에 대한 적용성을 검토하였다. Harrison(2007)은 수자원과 환경에 일반적으로 적용할 수 있는 불확실성 하의 의사결정을 시행하기 위해 베이지안 프로그래밍(Bayesian programming)의 새로운 방법을 제시하고 수질 오염 조절 문제에 적용하였다. Johnson and Weaver(2009)은 기후변화에 대한 유역과 수자원의 의사결정 관리를 지원하기 위해 영향평가 체계를 제시하고 리스크 평가와 관리 방식으로 접근해야 한다고 주장하였다. Guo et al.(2010)은 불확실성을 고려한 수자원 관리를 위해 Fuzzy Stochastic Two-stage Programming(FSTP)를 개발하였고, Li et al.(2010)도 이와 비슷한 맥락에서 Fuzzy-Boundary Interval-Stochastic Programming(FBISP)방법을 개발하였다. Lempert and Groves(2010)은 기후변화에 대응하기 위한 로버스트 적응 전략을 찾기 위해 로버스트 의사결정을 이용하여 실재유역에 적용하여 로버스트 의사결정이 적응전략을 평가하고 설계하는 데 유용한 체계라는 것을 입증하였다. Steinschneider and Brown(2012)은 기후변화와 기후변동을 반영하기 위한 댐 운영의 동적 시스템(dynamic system)과 예상치 못한 기후변화 결과에 대한 위험(risk)을 회피하기 위한 리얼 옵션(real option)의 조합을 통해 로버스트 적응 시스템을 작성하였다. 이상의 주 연구동향을 정리하면 Table. 2.2와 같다.

Table 2.2 Literature review for water resources planning (*continued*)

Title	Year	Author	Description
선진국의 기후변화 연구동향(Ⅱ) - 수자원관리에 대한 영향을 중심으로 -	2000	김영오	기후변화와 수자원관리에 대한 연구사례를 서술하고 전 세계에서 수행되고 있는 기후변화 연구과업을 정리
Assessing the Robustness of Adaptation Decision to Climate Change Uncertainties: A Case Study on Water Resources Management in the East of England	2007	Dessai, S. et al.	기후변화 불확실성에 대해서 robust한 적응 전략을 찾는 영향 체계(framework)를 제시. 영국 동부의 Anglian water services' 25 plan(WRP)에 적용됨. 모델링에 다양한 불확실 요소들의 지역적 민감도 분석을 실시하여 기후변화에 적응하기 위한 대안에 영향을 끼치는지 아닌지를 결정함
A New Analytic Method for Finding Policy-Relevant Scenarios	2007	Groves, D. G. and Lempert, R. J.	기후변화에서 시나리오를 이용한 의사결정 방법 중 로버스트 의사결정(Robust Decision Making)에 기반을 둔 방법을 제시하고 캘리포니아의 장기적 수자원 계획에 대한 적용성을 서술함
Two-Stage Decision-Making under Uncertainty and Stochasticity: Bayesian Programming	2006	Harrison, K. W.	수자원과 환경에 일반적으로 적용 할 수 있는 불확실성 하의 의사결정을 하기 위한 베이지안 프로그래밍(Bayesian Programming)의 새로운 방법을 제시하고 수질 오염 조절 문제에 예시로 적용함
Test Application of Bayesian Programming: Adaptive Water Quality Management under Uncertainty	2007	Herrison, K. W	베이지안 프로그래밍을 Athabasca river 유역에 적용하여 불확실성을 고려한 adaptive 수질관리를 평가함
A Framework for Assessing Climate Change Impacts on Water and Watershed Systems	2009	Johnson, T. E. and Weaver, C. P.	기후변화에 대한 유역과 수자원의 의사결정 관리를 지원하기 위하여 영향평가 체계 제시. 현재 모델링 수행능력에 한계가 있기 때문에, 예측 문제보다는 리스크 평가와 관리의 측면에서 접근해야 한다고 주장

Table 2.2 Literature review for water resources planning

Title	Year	Author	Description
A Two-Stage Programming Approach for Water Resources Management under Randomness and Fuzziness	2010	Guo, P. et al.	불확실성 하에 수자원 관리를 위해 Fuzzy Stochastic Two-Stage Programming (FSTP)을 개발함
Planning Water Resources Management Systems Using a Fuzzy-Boundary Interval-Stochastic Programming Method	2010	Li, Y. P. et al.	불확실성 하에 수자원 관리를 위해 Fuzzy-Boundary Interval-Stochastic Programming (FBISP) 방법을 개발함
Identifying and Evaluating Robust Adaptive Policy Response to Climate Change for Water Management Agencies in the American West	2010	Lempert, R. J. and Groves, D. G..	기후변화 대응하기 위한 안정적인 적응 정책을 찾고 평가하기 위해 로버스트 의사결정을 이용하여 America west의 IEUA에 적용함. 로버스트 의사결정이 의사결정자가 적응전략을 평가하고 설계하는 것을 돕는 역할을 하는 것을 입증함

제 3 장 이론적 배경

본 장에서는 크게 두 가지 부문으로 나누어 이론적 배경을 설명하고자 한다. 3.1절과 3.2절에서는 각각 ‘기후변화와 불확실성’, ‘의사결정 기법’에 관한 이론을 통해 본 논문에서 제시하고자 하는 기후변화 하의 ‘최적 의사결정(Optimal Decision Making, ODM)’과 ‘로버스트 의사결정(Robust Decision Making, RDM)’ 대한 이해를 도울 것이다. 3.3절과 3.4절은 제 4장의 사례 작성에 관련된 내용으로 ‘기상 및 유량 시나리오 작성’과 ‘대안 설정 및 저수지 운영 평가’에 대한 이론적 배경을 서술하도록 하겠다.

3.1 기후변화와 불확실성

3.1.1 기후변화의 특성

1980년대 이후로 수자원 부문에서의 기후변화 연구는 급속히 진행되어 왔다. 그러나 국내외의 기후변화와 관련된 대부분의 수자원 연구는 기후변화 전망에 의한 영향 평가에만 치중되어 있고 적응전략에 관한 부분은 매우 미비하였다. 그나마 진행된 적응에 관한 연구는 전략 수립을 위한 취약성 분석에만 초점이 맞추어져 있고 그 외에는 해외사례 연구를 통한 분석이나 이를 통한 제언정도에 머물러 있었다. 이렇게 수자원 부문에 기후변화를 접목한지 약 20년이 지났음에도 불구하고 적응전략 실현화가 더딘 이유는 크게 ‘비정상성(non-stationarity)’과 ‘불확실성(uncertainty)’이라는 두 가지 특이점에서 찾을 수 있다. 먼저 비정상성이란 기후변화로 인해 과거 기상 변수의 통계 추세가 변하는 것을 의미한다. 수문분석은 일반적으로 과거 기상 추세가 미래에도 지속된다는 기상자료의 정상성에 기반하고 있는데 과거와는 다른 경향을 보이는 기후변화가 발생하면서 비정상성을 고려한 새로운 분석 방식이 요구되고 있는 것이다. 두

번째 불확실성은 과거의 관측치를 토대로 계획을 세웠던 기존의 방식과 달리 온실가스 배출 시나리오와 다양한 기후모델 결과를 통한 영향 분석, 그리고 이를 통한 의사결정까지의 전반적인 과정으로 인해 이전보다 매우 복잡적으로 발생한다. 따라서 기후변화로 인한 다양한 변수들이 연루된 복잡한 상황 하에 서의 새로운 의사결정체계가 필요한 것이다. 불확실성은 UKCIP(2003)에 의하면 위험과 관련된 지식의 결핍 정도라고 정의된다. 여기에서 위험이란 특정 상태가 일어날 가능성(likelihood)과 그 영향의 결과(consequence)에 관한 지식이 결합된 개념을 뜻하며 어떠한 사상의 발생 빈도수와 그 사상이 일으킬 수 있는 결과의 규모를 고려한다고 말할 수 있다. 다시 말해 불확실성이란 포괄적으로 의사결정에 제공되는 정보에 대한 지식이 부족한 상황을 의미한다. 이러한 맥락에서 본 논문은 불확실성에 초점을 맞추어 의사결정 기법에 관하여 연구하였다.

3.1.2 기후변화의 불확실성 유형

기후변화에 불확실성이 존재하지 않는다면 이에 대비하는 정책 및 전략 결정의 어려움은 존재하지 않을 것이다. 그러나 기후변화에는 다양한 불확실성이 존재하기 때문에 실제 공간에 기후변화의 영향을 이해하고 대비하기는 쉽지 않다. 본 장에서는 의사결정기법과 의사결정 환경의 종류에 대해서 알아보고 기후변화가 어떠한 의사결정 환경으로 분류되는지 살펴보고 이에 적합한 의사결정기법을 알아보도록 하겠다.

의사결정이란 일반적으로 과학경영(operational research)에서 주로 사용되었던 개념으로 주어진 상황 혹은 환경에 따라 복잡하거나 선택 가능한 대안들을 평가하고 최선의 대안을 선택하는 일련의 과정으로 정의된다. 따라서 의사결정 방법을 결정하기 위해서는 의사결정 환경 즉, 본 연구에서는 기후변화의 상황이 어떠한 의사결정 환경에 속하는지 아는 것이 중요하다. 의사결정 환경은 일반적으로 ‘확실성하의 의사결정(decision

making under certainty)', 'moderate 불확실성하의 의사결정(decision making under mild uncertainty)', 'deep 불확실성하의 의사결정(decision making under deep uncertainty)' 크게 세 가지로 나뉜다. '확실성하의 의사결정'이란 여러 가지 선택 가능한 대안이 있을 때 각 대안을 선택한 경우 어떤 결과가 발생할지를 의사결정자가 확실히 알고 있는 상황을 말한다. 'Moderate 불확실성하의 의사결정'은 미래에 전개될 수 있는 상황에 대해서 각 상황의 발생가능성을 확률로 나타낼 수 있는 경우이다. 'Deep 불확실성하의 의사결정'은 발생 가능한 여러 가지 상황들을 추정할 수 있고 또 각 대안과 상황에 따른 의사결정의 결과를 추정할 수 있으나 상황의 발생확률을 거의 예측할 수 없는 경우를 말한다. 일반적으로 과학경영 분야에서는 'moderate 불확실성 하의 의사결정'을 'risk 하의 의사결정', 'deep 불확실성 하의 의사결정'은 'uncertainty 하의 의사결정'이라는 용어를 쓰고 있지만 본 연구에서는 불확실성의 심각성(severity)에 초점을 맞추어 두 개념을 구분하기 위해 동일한 의미로서 각각 moderate와 deep이라는 용어를 사용하였다.

UKCIP(2003)는 불확실성을 그 특성에 따라 분류하여 기후변화 불확실성의 위치를 파악하였다. Figure 3.1을 보면 y 축과 x 축은 각각 특정 사상(particular events)에 대한 발생확률에 관한 지식(knowledge of probability)과 그 사상의 결과 혹은 영향에 대한 지식(knowledge of consequence)을 표현한다. 1사분면의 불확실성은 다년간 잘 구축된 자료와 기후추세가 전망이 가능하게 움직일 경우의 불확실성으로 상대적으로 조절하기 쉬운 특징을 가진다. 예를 들면 매년 특정 시기에 발생하는 홍수는 비교적 발생확률과 그 영향 정도에 대한 지식의 정도가 높다고 볼 수 있다. 이것은 기후변화 적응 관련 정책 및 전략 설정 시 의사결정의 어려움이 상대적으로 적다. 2사분면에서 존재하는 불확실성은 발생확률에 관한 지식은 높지만 그 결과와 영향에 대한 지식 정도가 낮은 불확실성을 의미한다. 예를 들면 해수면 상승(sea level rise)의 경우 바다 높이의 상승은 과거의 꾸준한 데이터 수집으로 측정 가능하지만 이를 통해

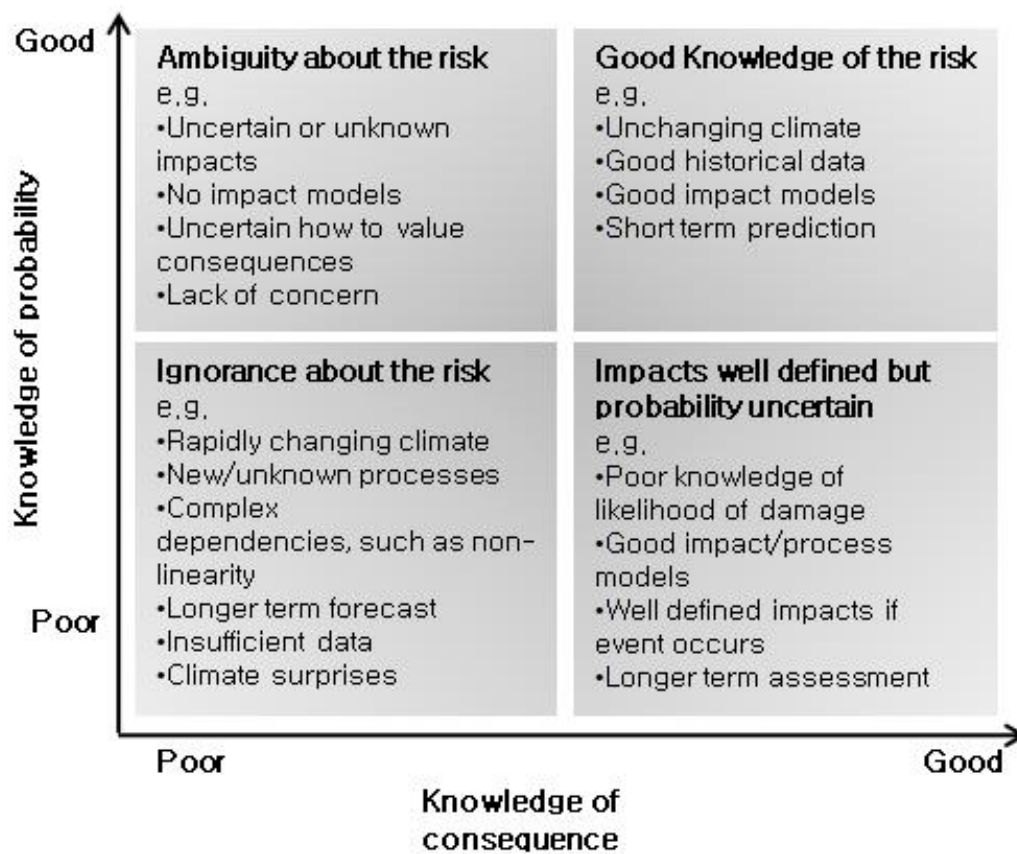


Figure 3.1 Classification of uncertainties and responses (UKCIP, 2003)

발생할 수 있는 영향의 결과 예측 정도는 상대적으로 낮을 수밖에 없다. 4사분면의 불확실성은 언제 어떻게 발생할지에 대한 발생확률에 관한 지식은 낮지만 결과에 대한 지식 정도가 높은 불확실성을 의미한다. 예를 들어 집중호우의 경우 발생확률에 대한 지식 정도는 낮지만 피해경험과 과거 데이터 등이 많아 재해 영향에 대한 지식은 상대적으로 높다. 마지막으로 3사분면은 무지(ignorance)의 불확실성으로 UKCIP(2003)는 기후변화는 그 패턴이 매우 복잡하고 과거 데이터 역시 구축되지 못하여 발생확률에 관한 지식과 그 영향에 대한 지식 정도가 미비한 상태의 불확실성이기 때문에 3사분면에 속한다고 보고 있다. 즉 기후변화는 첫 번째로 시나리오 발생확률(likelihood)에 대한 정보의 부족, 두 번째로 시나리오 발현 시 어떠한 영향을 받을지 모르는 지식의 부재라는 두 종류의 불확실성으로 인해 적응정책 수립에 큰 어려움을 준다고 볼 수 있다. 여기에서 시나리오 발생확률에 대한 정보의 부족이라는 1차의 첫 번째 불확실성에 초점을 맞추면 앞서 설명한 ‘deep 불확실성’ 상황으로 의미가 상통하는 것을 알 수 있다. 본 논문에서는 기후변화의 특성 중 deep 불확실성에 초점을 맞추어 의사결정 기법을 논의하였다.

3.2 의사결정 기법(Decision Analysis)

일반적으로 불확실성이 존재하는 상황 하에 대안을 평가할 시 일반적으로 사용되는 의사결정 방법은 시나리오 발생확률에 의존하여 최적 대안을 채택하는 최적 의사결정(Optimal Decision Making, ODM)이었다. 즉 주어진 정보를 가지고 가장 높은 기댓값(expected value)을 갖는 대안을 찾는 것을 목표로 의사결정자들은 계획의 목적에 부합하는 최적의(optimal) 결과물을 가져오는 대안을 채택하는 것이다. 그러나 이러한 기법은 3.1절에서 설명한 시나리오에 대한 정보 즉 확률이 정량화되어있고 주어진 정보의 신뢰가 높은 상황인 ‘확실성하의 의사결정’ 혹은

‘moderate 불확실성하에서 의사결정’에만 적합하다. 따라서 확률을 파악하거나 추정하는 것이 불가능한 deep 불확실성으로 구분된 기후변화 상황의 경우는 최적 의사결정(Optimal Decision Making, ODM)이 아닌 새로운 의사결정 기법의 적용이 필요하다. 이러한 맥락에서 본 절에서는 일반적으로 사용되는 ‘최적 의사결정(ODM)’과 기후변화 하의 새로운 의사결정 기법으로 제시하고자 하는 ‘로버스트 의사결정(RDM)’에 관하여 설명하고자 한다.

3.2.1 최적 의사결정(Optimal Decision Making)

최적 의사결정은 앞서 설명한 의사결정 환경의 분류 중 확실성 하의 의사결정 혹은 moderate 불확실성하에서 이루어질 수 있는 의사결정이다. 즉 대안을 선택하고 설계를 지원하기 위해 분석을 수행 할 시 시나리오의 확률을 기반으로 다양한 형태의 정보를 조합시킨다. USCCSP(2009)은 불확실성을 확률로 서술하는 이러한 최적 의사결정은 의사결정나무(decision trees)나 영향 다이어그램(influence diagram) 등과 같은 강력한 도구를 사용하여 대안을 서술하여 기댓값을 산정하여 최적 대안을 추출해 낸다고 하였다. 식 (3.1)의 i 번 째 대안의 기댓값($EV(A_i)$)은 i 번 째 대안(A_i)과 j 번 째 시나리오(S_j)에 해당하는 성능인자에 각 시나리오에 부여된 확률($P(S_j)$)을 곱한 값의 합이다.

$$EV(A_i) = \sum_{j=1}^n performance(A_i, S_j) \times P(S_j) \quad (3.1)$$

이러한 도구는 의사결정의 목적이 다양하고 분쟁의 소지가 있을 때 대안을 수학적으로 분석하여 순위(ranking)를 매김으로써 의사결정자가 계획의 목적에 부합한 대안을 찾을 수 있도록 돕는다. 또한 최적 의사결정은 산정된 대안을 이용해 수많은 반복(iteration)을 시행할 수 있는 가능성이

있다는 이점이 있다.

최적 의사결정의 과정은 일반적으로 Figure 3.2와 같이 다섯 개의 단계로 구성된다. IPCC(2000a)는 최적 의사결정의 서너 가지의 장점을 강조하였는데, 그 중 하나는 여러 가지 대안에 관한 복잡한 문제들을 간략화 시켜주고 시스템적으로 정보를 구조화 시켜준다는 점이다. 최적 의사결정은 Figure 3.2에 나와 있듯이 불확실성을 확률로 나타냄으로써 명확하게 서술하여 상대적으로 그 결과에 대해 의사결정자들과의 커뮤니케이션을 쉽게 만든다. 다시 말해 최적 의사결정 분석은 기술적(technical), 환경적(environmental), 경제적(economic), 사회적(social) 등의 다양한 유형의 의사결정 목적의 고려가 가능하게끔 하고 지식(knowledge)과 선호도(preference)를 이끌어내는 편리한 도구인 것이다.

최적 의사결정 분석에는 몇 가지 한계점이 존재한다. 그 중 하나는 복잡하고 높은 불확실성의 범위에 대하여 수행되기 어렵다는 것이다. 불확실성이 큰 기후변화의 경우는 미래 상태의 범위에 대한 이해를 얻거나 대안을 수정하여 더 나은 성능인자(performance index)를 도출하기 위하여 하나의 선호되는 대안보다 탄성력이 있는 대안의 세트(set)가 선호된다. 그러나 미래 상태에 대해 과학적인 증거나 전문가들의 판단에 의해 산정된 확률을 이용하는 최적 의사결정은 하나의 대안만을 확인하는 데 유용하다. U.S climate change science program에서는 기후에 관련된 문제에 최적 의사결정의 적용성과 사용성에는 제한이 있다고 언급하였다(Morgan et al., 2009). 그 이유에 대해서 Groves and Lempert(2007)는 대안 분석의 착수 시점에서 완벽한 대안의 세트가 구성될 수 없고 미래 대안에 대한 결과의 불확실성이 너무 커서 파악되기 어려우며 대안 별 잠재적 결과의 과정에 대해서도 의사결정자 및 이해당사자 사이에서 동의가 이루어지기 힘들기 때문에 최적 의사결정을 적용하기 어렵다고 말한다. 한편 Groves and Lempert(2007)는 수많은 전문가를 통해 이루어진 주관적인 확률 대해서도 의사결정자 입장에서는 의문을 가질만한 사항이라고 언급하였다.

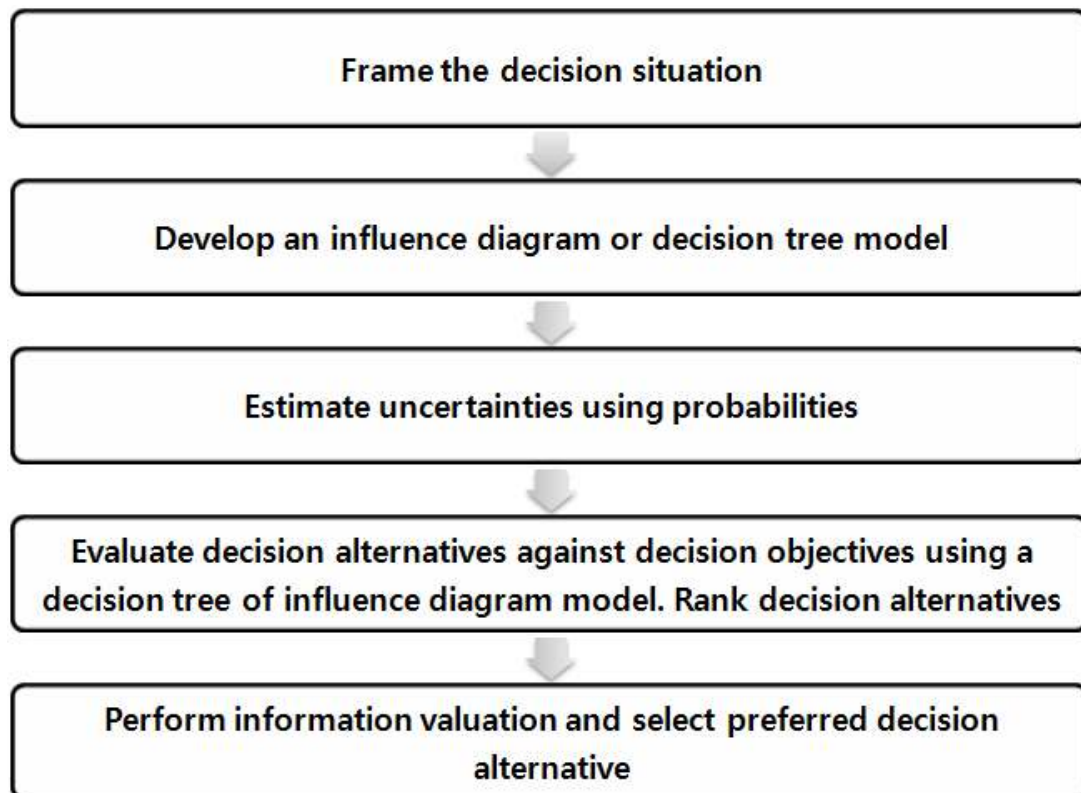


Figure 3.2 Process of optimal decision making (WCUA, 2010)

3.2.2 로버스트 의사결정(Robust Decision Making)

U.S climate change science program은 기후변화 하에 최적 의사결정 적용성의 한계를 언급하며 로버스트 전략(robust strategy)과 확률분포의 범위에 대한 고려를 제안했다. IPCC는 Robustness를 “strength; degree to which a system is not given to influence”라고 정의한다. Dessai(2005)는 확률로부터 불확실성이 정량화 될 수 없다는 가정 하에 기후변화 적응전략을 로버스트 분석을 통해 평가하였다. Lempert(2004)는 기후변화 미래의 모든 범위에 대하여 로버스트한 전략을 탐색해야 한다고 제안했다. 여기서 Lempert(2004)가 말하는 로버스트 전략이란 미래의 다양한 상태 즉 불확실성에 대하여 성능인자가 둔감(insensitive)하다는 개념이다. Dessai(2005)와 Dessai and Sluijs(2007)은 영국의 동부지역을 대상으로 민감도 분석을 시행해 성능인자가 민감하게 영향을 받는 변수를 파악하여 실제 해당지역의 2030년 물 공급 계획에 대하여 다양한 불확실성 요소들을 고려해 성공 여부를 평가를 하였다.

RAND(2003)는 기후변화를 반영한 장기적인 정책의 분석을 위하여 로버스트 의사결정(Robust Decision Making, RDM)을 개발하였다. RDM이란 Figure 3.3에 나타난 것처럼 다양한 미래 기상 시나리오를 적용하여 낮은 후회도(regret)를 갖는 후보 전략을 선정한 뒤 대안의 성능인자에 민감하게 영향을 미치는 불확실성의 요소를 파악하여 적용한 시나리오를 검토하고 대안을 업데이트해서 일정 수준까지 시나리오 변화에 둔감한 대안을 찾는 과정 전반의 의사결정 기법이다. RDM은 다음과 같은 몇 가지 특징이 있다. 첫째, 미래에 대한 불확실성을 서술하기 위하여 몇 개의 시나리오의 발생확률에 의존하지 않고 가능한 한 수많은 시나리오 앙상블(ensemble)을 고려한다. 여기에서 다양한 미래의 상태를 반영하기 위하여 사회 경제 및 기후 등의 다양한 요소에 대한 상태들을 도입하기도 한다. 둘째, RDM은 시간에 따라 새로운 정보를 업데이트 하여 대안이 좀 더 안정적인 대안이 될 수 있도록 진화시킨다. 셋째, RDM은 최적

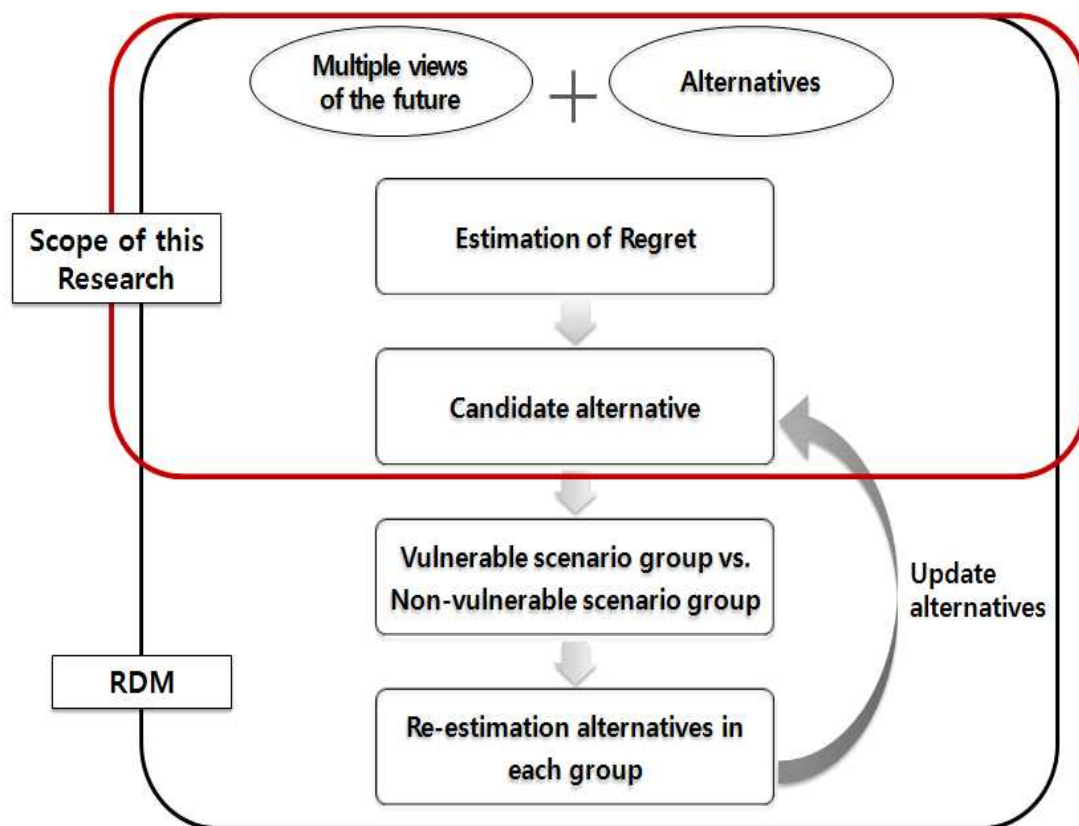


Figure 3.3 RDM flowchart

인자(optimal criteria)가 아닌 로버스트 인자(robust index)를 이용하여 대안 순위를 산정한다. RDM에서는 로버스트 인자로 시나리오 내에서 가장 좋은 성능인자와 각 대안의 성능인자와의 차이인 후회도(regret)을 사용하였다. 후회도는 어떤 특정 시나리오가 발생했을 경우에서 가장 성능이 우수하게 나타나는 대안을 채택하지 않았을 시의 후회 정도를 의미하는 것이다. 식 (3.2)에서 A_i 는 i 번째 대안, S_j 는 j 번째 시나리오, A' 는 모든 대안을 의미하는데, 각 시나리오를 고정시키고 모든 대안에서 가장 성능인자가 큰 값에서 각 대안의 성능인자 값을 빼 후회도를 산정하게 된다. 그 후 시나리오와 대안 별로 계산된 후회도를 식 (3.3)에 대입하여 각 대안의 최대 후회도를 추출하여 대안들 중 최소의 최대 후회도를 갖는 대안을 1순위 삼는 방식이다.

$$Regret(A_i, S_j) = \max_{A'} [performance(A', S_j)] - performance(A_i, S_j) \quad (3.2)$$

$$Min[Max_s, Regret(A_i, S')] \quad (3.3)$$

RDM에서 로버스트 인자로 후회도를 사용하는 이유는 첫 째로 다양한 미래 상황이 발생할 수 있다는 것을 인정하고 특정대안을 택할 때 입을 수 있는 최대손실을 회피함으로써 보수적(conservative) 대안을 찾기 위함이다. 두 번째 이유로는 미래 상황의 가능성에 대한 정보가 부족할 시 과거 의사결정자가 완벽한 예지능력이 있다면 선택했을 법한 전략들의 결과를 후회도의 값을 통해 예상할 수 있게 함으로써 미래 벤치마킹 측면에서 도움을 줄 수 있기 때문이다(RAND, 2000).

본 연구에서는 국내에서 처음으로 시도되는 RDM의 초기연구로서 Figure 3.3에 나타난 것처럼 로버스트 인자를 통해 후보 대안을 선정하는 과정까지만 시행하였고 불확실성의 요소를 파악하여 대안을 업데이트하는 과정은 생략하였다. 앞서 설명한 RDM이 세 가지 특성 관점에서 볼 때 본 연구는 가능한 다양한 미래 기후시나리오를 사용했다는 첫 번

째 특성과 후회도 인자를 사용하여 후보대안을 선정했다는 세 번째 특성을 반영하였다고 볼 수 있다.

3.3 기후변화 영향평가

3.3.1 배출 시나리오와 GCM 및 상세화 기법

(1) 온실가스 배출시나리오

기후변화의 영향을 평가하기 위해서는 목적에 맞게끔 미래의 온실가스 배출시나리오를 선정하고 기후모형에 의하여 기상 시나리오를 작성해야 한다. 온실가스 배출시나리오는 기상시나리오를 작성하기 위한 선행 자료로 전 세계적으로 IPCC Data Distribution Center에서 제공하는 SRES (Special Report on Emission Scenarios)가 사용되고 있다. SRES는 인구학, 사회 및 경제학, 기술적인 요인을 복합적으로 고려하여 온실가스 배출을 발생시키는 개발 방향을 경제와 환경으로 나누어 A1, A2, B2 그룹으로 나눈다. Figure 3.4의 A그룹과 B그룹은 발전에 대해 각각 경제중심적인지와 환경 지향적인지를 나타내며 1과 2그룹은 발전의 방향에 관한 것으로 각각 전 지구적인지와 지역주의적인지에 따라 나누고 있다. A1은 지구 총 인구가 향후 반세기 안에 최고점에 도달하는 급격한 경제성장이라는 사회를 나타내며, 화석연료 중심인 A1F1, 비 화석연료 에너지 중심인 A1T, 모든 자원들 간의 균형을 A1B의 세 가지 종류로 분류된다. B1은 빠른 서비스와 정보로 인해 급속한 변화를 일으키고 인구 성장 또한 빠르게 일어나는 사회를 가정한다. B2는 인구 성장과 경제의 성장이 중간 정도이며 다양한 분야의 지역별 해결책을 제시하는 사회이다. 마지막으로 A2는 급격한 인구성장이 발생하는 사회지만 느린 경제발전이 이루어지는 사회를 의미한다(IPCC, 2003; 2007).

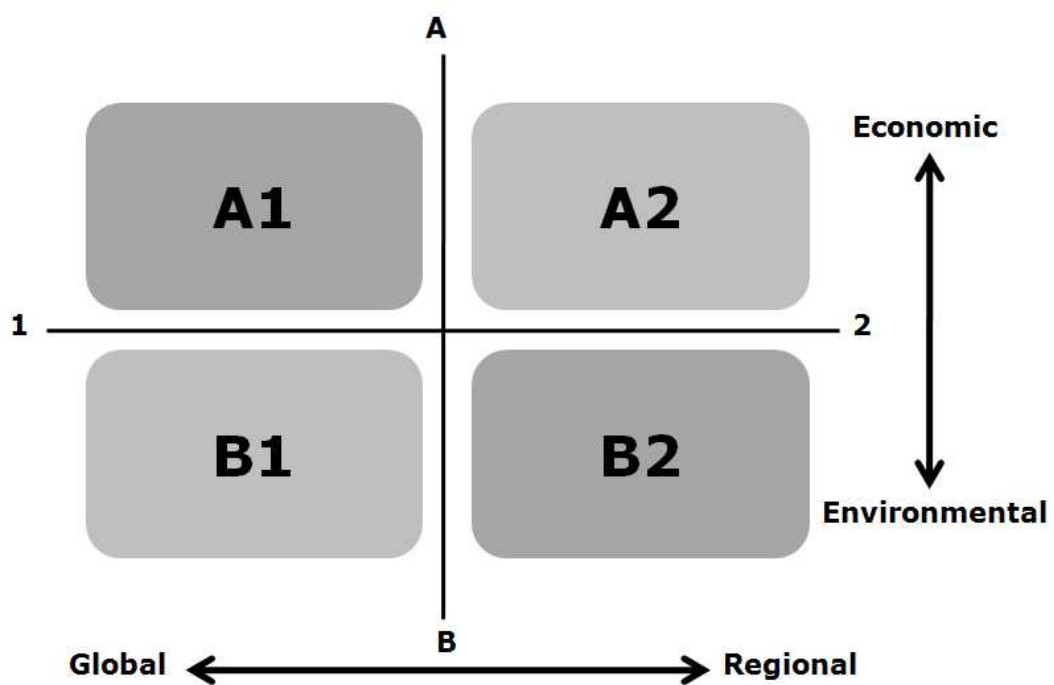


Figure 3.4 SRES scenarios

(2) 전 지구 모형(General Circular Model, GCM)

세계의 미래 기후를 온실가스 농도에 따라 모의할 수 있는 모델인 GCM은 대기, 해양, 빙하권과 지표면에서 일어나는 모든 물리적인 변화를 반영하는 수치모델이다. 온실가스에 의한 지구의 시스템을 모의하기 위해 현재 가장 효과적인 도구로서 GCM은 지역의 기후변화에 대한 지리적 및 물리적 정보를 제공할 수 있다(IPCC, 2007; USGS, 2009). 현재 많은 나라의 연구기관에서는 GCM을 각각 개발하여 사용하며 모형에 사용되는 매개변수를 산정하는 방법과 격자의 크기가 달라 그 결과 또한 매우 다양한 양상을 보이고 있다. Table 3.1에서는 현재 최신 버전인 IPCC 4차 보고서에서 제공한 24개 GCMs의 리스트이다.

(3) 스케일 상세화기법(downscaling method)

온실가스 배출시나리오 따라 GCM에 의해 산출된 기후의 결과는 사실상 공간 분해능이 수백 km 이상이기 때문에 실제로 수자원 연구에 필요한 유역 규모 크기의 기후현상을 면밀히 살펴볼 수 없다는 어려움이 있다. 따라서 GCM에서 모의된 기상 결과를 그대로 사용하기보다는 지점과 유역 단위로 축소하기 위해 스케일 상세화기법 과정이 적용된다. 이러한 스케일 상세화기법은 크게 동역학적 상세화기법(dynamical downscaling)과 통계학적 상세화기법(statistical downscaling)으로 분류될 수 있다(IPCC, 2007). 동역학적 상세화기법은 통계적 상세화 기법의 단점으로 제시되는 현재의 추세를 미래에 일괄적으로 반영한다는 단점을 보완하고 GCM을 기반으로 경계조건을 축소하여 적용하는 기법이다. 이것은 위·경도 0.5° 이하 규모의 기상 요소를 물리적 과정을 통해 매개변수화하여 대상 지역의 시나리오를 작성하여 GCM의 기후결과와 비교함으로써 지형적 특성을 반영할 수 있다. 통계학적 상세화기법은 해상도가 큰 기후의 변수들을 지역의 국지 변수에 연결시켜 축소화하는 방법으로 동역학적 상세화기법에 비해 비용이 저렴하고 새로운 자료에 대한 적용성이

Table 3.1 GCMs for IPCC AR4 reports

Center	Center Acronym	Model
Beijing Climate Center China	BCC	CM1
Bjerknes Centre for Climate Research Norway	BCCR	BCM2.0
Canadian Center for Climate Modelling and Analysis, Canada	CCCma	CGCM3 (T47 resolution)
		CGCM3 (T63 resolution)
Centre National de Recherches Météorologiques, France	CNRM	CM3
Australia's Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, Australia	CSIRO	Mk3.0
Max-Planck-Institut for Meteorology Germany	MPI-M	ECHAM5-OM
Meteorological Institute, University of Bonn, Germany	MIUB	ECHO-G
Meteorological Research Institute of KMA, Korea	METRI	
Model and Data Group at MPI-M, Germany	M&D	
Institute of Atmospheric Physics, China	LASG	FGOALS-g1.0
Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, USA	GFDL	CM2.0
		CM2.1
Goddard Institute for Space Studies, USA	GISS	AOM
		E-H
		E-R
Institute for Numerical Mathematics, Russia	INM	CM3.0
Institut Pierre Simon Laplace, France	IPSL	CM4
National Institute for Environmental Studies, Japan	NIES	MIROC3.2 hires
		MIROC3.2 medres
Meteorological Research Institute, Japan	MRI	CGCM2.3.2
National Centre for Atmospheric Research, USA	NCAR	PCM
		CCSM3
UK Met. Office, UK	UKMO	HadCM3
		HadGEM1
National Institute of Geophysics and Volcanology, Italy	INGV	SXG 2005

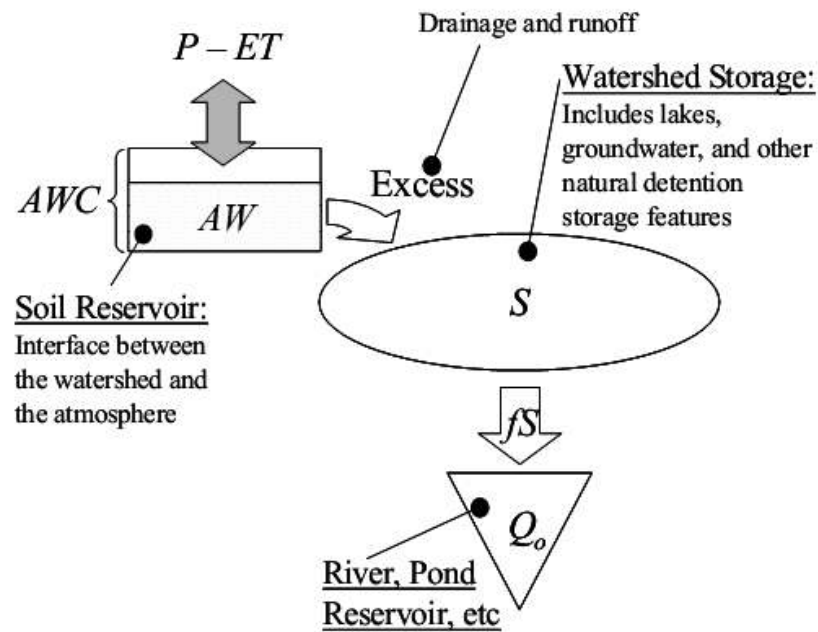
뛰어나고 소모 시간도 상대적으로 적다는 장점이 있다(IPCC, 2007).

본 연구에서는 최근 기후변화 연구에 가장 활발하게 사용되고 있는 통계학적 상세화기법을 사용하고 있는 LARS-WG 3.0을 이용하여 대상구역의 기후를 모의하였다. LARS-WG 모형은 지점 관측자료의 통계학적 특성을 반영하여 미래 기후 시나리오를 통계학적으로 발생시키는 방법으로 Racsko et al.(1991)에 의해 개발되었다. 모형은 크게 천이확률과 강수량의 확률밀도함수를 이용하여 발생시킨 강수를 조건부로 습도, 일사량, 잠재증발산량 등을 함께 모의하게 된다. 매개변수를 산정하는 과정에서 LARS-WG는 강수의 반 경험적 분포를 사용하여 10개의 구간으로 나누고 각 구간의 난수를 발생시켜 확률에 해당하는 값을 단일 분포로 표현한다. 이 분포는 21개의 매개변수를 이용하는데 11개의 구간 간의 차이를 나타내는 변수와 10개의 각 구간의 사상 수를 나타내는 변수로 구분되어 구성된다. 입력 자료로는 20 ~ 30년 이상의 일 단위 강우 관측자료를 사용해야 하는데 이는 지점의 기상변수가 지니고 있는 통계적 추세를 반영하기 위함이다.

3.3.2 물수지 모형

물수지 모형이란 Figure 3.5의 개념도와 같이 토양 속에 함유된 수분이 강우와 증발에 의해 증감한 후 잔여량이 지표면으로 유출되어 호수, 지하수와 같은 자연적 저류물과 같은 유역에 의해 일정시간이 지체되었다가 최종유출로 나타나는 현상을 몇 개의 매개변수와 간단한 식으로 표현한 개념적인 모형을 뜻한다(윤용남, 2007). 물수지 모형은 강우-유출 모형과 같이 유역의 유량을 분석하기 위해 사용되는 모형이지만 강우-유출 모형은 지배방정식을 기반으로 하는 반면 물수지 모형은 모형 내에 내장되어 있는 수식들 간의 물수지(water balance)를 충족시킴으로써 유량을 계산한다(Su and Sigh, 1998).

본 연구에서 미래 수자원 시스템에 미치는 영향을 평가하기 위해 필요한 기후변화 유량 시나리오를 모의하기 위해 *abcd*모형을 사용하였다.



Notation: AWC = Available Water Capacity
 AW = Available Soil Water
 P = Precipitation
 PET = Potential Evapotranspiration

Figure 3.5 Conceptual diagram of water balance model
 (<http://aben.cals.cornell.edu>)

$abcd$ 모형은 1981년 Thomas에 의해 개발된 이후 물수지 모형으로 가장 많이 이용되고 있다. W_t 와 Y_t 는 각각 가용수량(available water)과 유역의 기회증발산량(evapotranspiration opportunity)을 의미하며 그 식은 식 (3.4)와 (3.5)와 같다.

$$W_t = P_t + S_{t-1} \quad (3.4)$$

$$Y_t = E_t + S_t \quad (3.5)$$

P_t 는 t 기간 동안 내린 강우량을, S_{t-1} 은 t 월 초의 토양수분량을 의미하고 E_t 는 t 기간 동안의 실제 증발산량을, S_t 는 t 월 말의 토양수분량을 의미한다. 기회증발산량 Y_t 는 가용수량 W_t 의 비선형함수로 식 (3.6)과 같이 나타내어진다.

$$Y_t(W_t) = \frac{W_t + b}{2a} - \sqrt{\left(\frac{W_t + b}{2a}\right)^2 - \frac{W_t b}{a}} \quad (3.6)$$

여기서 첫 번째 매개변수 a 는 토양이 포화되어 있을 경우 유출이 일어나는 정도를 표현하고 두 번째 매개변수 b 는 증발산량과 토양수분량의 합의 최고 한계치를 의미한다. 토양수분량의 값은 기회증발산량과 잠재증발산량을 이용해 식 (3.7)과 같이 구한다.

$$S_t = Y_t \exp(-PE_t/b) \quad (3.7)$$

여기서 S_t 는 t 월말 토양수분량 값이고 PE_t 는 t 월의 잠재증발산량을 의미한다. 최종적으로 유출량 R_t 는 가용수량과 기회증발산량을 사용하여 식 (3.8)과 (3.9)에 의해 계산된다.

$$R_t = (1 - c)(W_t - Y_t) + dG_t \quad (3.8)$$

$$G_t = [c(W_t - Y_t) + G_{t-1}]/(1 + d) \quad (3.9)$$

여기서 G_t 는 t 월 말 지하수함량을 뜻한다. $abcd$ 모형의 전체 수행되는 과정은 Figure 3.6과 같다.

3.4 대안 설정 및 저수지 운영 평가

3.4.1 대안 설정

대안의 설정이란 사업이나 계획의 목적이 무엇인가를 파악하고 그 목적에 적정한 수행 시기와 방식을 수립하는 일련의 과정을 말한다. 대부분의 대안은 한 가지 이상의 목적과 관련되어 있어 개별목적이 아닌 다수 목적의 조화가 필요하고 미래 기후, 경제 및 인구의 변화, 환경 등과 같은 불확실성의 요소들을 대안의 설립 과정에서 고려해야 한다. 일반적으로 불확실성의 요소들은 가정된 미래로 구성되어 대안 수립과정에 반영되는데 사실상 가정한 미래와 무관하게 수행될 수 있는 대안이 최선의 대안이라 할 수 있다(심명필, 2001). 이를 위해서는 대안을 유연하게 구성함으로써 미래를 대비하여 각종 대안이 가능하다는 사실을 유의하며 기술의 변동 가능성을 염두에 두어야 한다.

본 연구에서 적용할 용수공급계획을 위한 대안을 설정하기 위해서는 용수공급원의 종류, 공급량의 결정, 공급방법 결정 등의 세 가지 문제를 고려해야 한다. 이 세 가지 문제를 어떻게 다루어야 하는가에 따라 수많은 대안이 나올 수 있다. 보편적으로 대안은 구조물적 대안(structural alternative)와 비구조물적 대안(non-structural alternative)로 분류된다. 구조물적 대안이란 각종 수리구조물을 이용하는 방안으로 댐이나 저수지 건설 및 하천개보수와 제방 축조, 유수지와 배수펌프장 건설 등과 같이 시설물 설치에 관련된 것을 의미하며 일반적으로 비용이 소모된다. 비구조물적 대안이란 홍수예경보시스템 구축, 저수지 운영 등의 관리측면의 내용이 고려되며 대부분 비용이 거의 들지 않는다. 본 연구에서는 대안 평가를 위한 용수공급계획의 사례를 최대한 간략화 하기 위하여 대안을 설정하는 과정에서 비용이 소모되지 않는 비구조물적 대안으로만 그 범위를 제한시켰다.

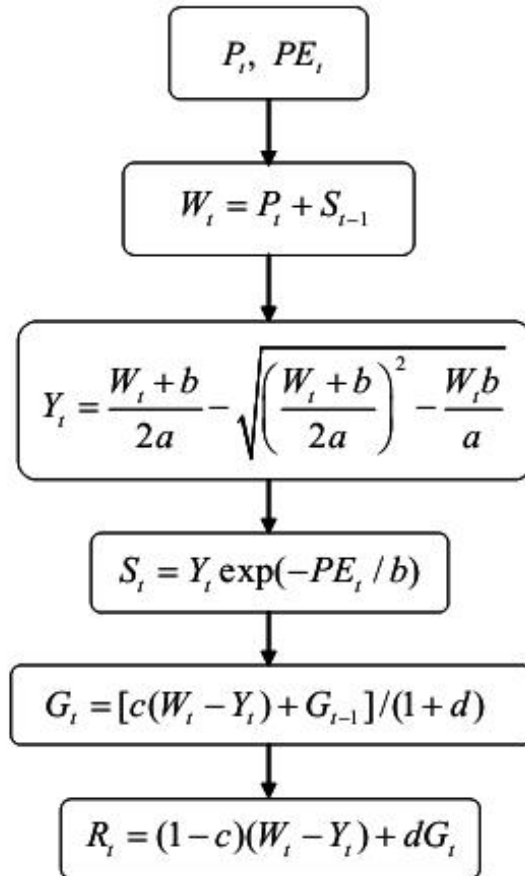


Figure 3.6 Flowchart of *abcd* model (Hwang, 2005)

3.4.2 저수지 운영 모형 및 평가

본 논문에서 의사결정 기법의 적용을 위한 용수공급계획의 사례 작성을 위해 HEC-ResSim 3.0을 사용하여 저수지 운영 모의를 실시하였다. Hec-ResSim 3.0은 1996년부터 미 공병단에서 20년 이상 사용되어 온 HEC-5을 사용자 인터페이스 형태로 개발한 다중저수지(multi-reservoir)운영 모형이다(류재욱, 2010). HEC-ResSim 3.0은 Figure 3.7와 같이 정의된 댐의 수위를 이용하여 저수지의 저류공간을 구분한다. 저수지 수위는 그 목적과 기능에 의해 댐 바닥으로부터 사수위(Dead Storage Level, DSL), 최저수위(Low Water Level, LWL), 상시만수위(Normal High Water Level, NHWL), 홍수기 제한수위(Restricted Water Level, RWL), 홍수위(Flood Water Level, FWL), 최고수위(Maximum Water Level, MWL) 등으로 구분되며 표고로 표시된다. 용수공급 측면에서 최저수위 이하는 가뭄 상태를 의미하는데, 사수위와 최저수위 사이의 영역일 때는 우선순위에 따라 정해진 최소 수요량만을 공급하며 사수위 이하일 때는 공급을 완전히 중단하게 된다. 최저수위와 상시만수위 사이에서는 해당 댐의 용수공급계획량을 충족시킬 수 있으며 상시만수위를 넘어설 경우에는 홍수상태로 구분되어 여수로 방류를 실시하게 된다. 이와 같이 댐의 수위에 따라 운영되는 형식을 반영하기 위해 Hec-ResSIM의 댐 방류 함수(dam release function) 룰(rule)을 사용하였다. 이 함수는 댐 방류를 정해진 날짜의 수요에 따라 제한시키는 가장 간단한 룰로 계절별로 방류제한을 두거나 시간에 따라 변하는 수위의 상태에 따라 최소 혹은 최소 방류량을 설정할 수 있다. Hec-ResSIM 3.0은 모형은 원시 코드가 공개되어 있지 않기 때문에 저수지의 운영 방법을 명확히 파악할 수는 없지만 해당 댐의 수위와 용수공급계획량 및 최소수요량을 기반으로 상시만수위를 유지할 수 있도록 목표가 설정되어 있다. 따라서 댐의 수위 설정에 따라 저수지의 운영방법과 방류량이 변화한다.

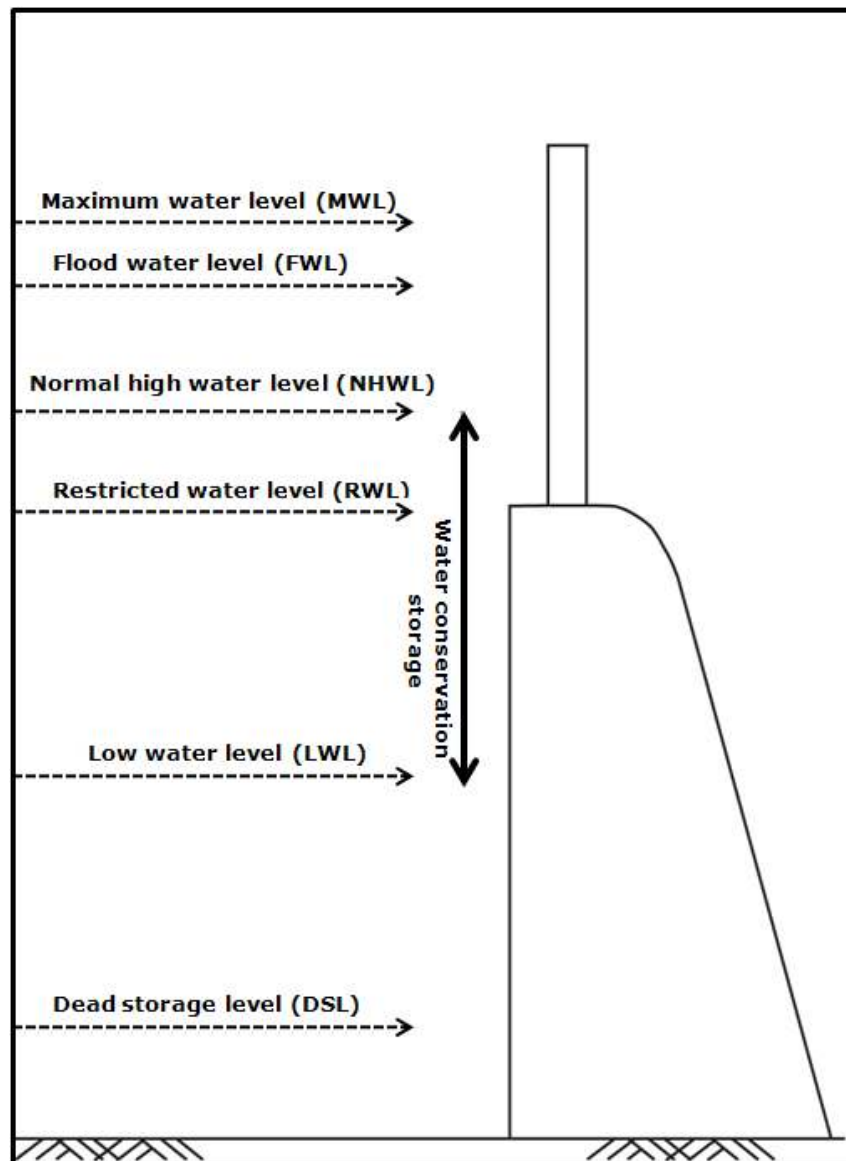


Figure 3.7 Distribution of a reservoir capacity

제 4 장 기후변화 시나리오 별 저수지 운영 평가

본 장에서는 ‘최적 의사결정(ODM)’과 ‘로버스트 의사결정(RDM)’을 적용하여 대안을 평가하고 로버스트 의사결정의 효과를 분석하기 위한 사례로서 용수공급계획을 위하여 미래의 댐 방류량을 도출하였고 저수지 운영능력을 평가하였다. 적용유역은 낙동강의 안동댐유역과 임하댐유역을 대상으로 하였으며 다양한 배출시나리오와 GCM을 선정하여 25개의 미래 기후시나리오를 생성하고 각 댐의 유입량을 작성한 뒤 용수공급계획량과 해당 댐 제원을 반영하여 방류량을 모의하였다. 본 장의 최종 결과물로 시나리오 별 용수공급량 및 여수로 방류량 등을 도출하여 다양한 성능인자에 대해 저수지 운영 능력을 평가하였다. 다음 장인 제 5장에서는 본 장의 결과를 기반으로 대안을 설정하고 과거와 미래시나리오에 대해 ODM과 RDM을 사용하여 성능인자 별로 순위를 산정하였고 제 6장에서는 기후변화 하의 상황 하에서 시나리오를 선택할 시 RDM의 효과에 대해서 분석하였다. 본 장부터 제 6장까지의 연구흐름도는 Figure 4.1과 같다.

4.1 대상 유역 및 댐 현황

안동댐 중권역은 낙동강유역 북동쪽에 위치하여 강원도 태백시 및 경상북도 안동시, 봉화군, 영양군, 울진군의 2도 2시 3군을 포함하는 유역이다. 유역의 면적은 낙동강유역의 6.9 %에 해당하는 1,628.68 km^2 이고 유로연장은 170.12 km이며 유역경계에서 유역 하구부까지의 최원유로연장은 171.04 km이다. 유역의 둘레는 272.06 km이고 유역평균폭은 9.52 km, 유역평균표고는 EL.549.3 m 유역평균경사는 41.88 %이다(Figure 4.2). 안

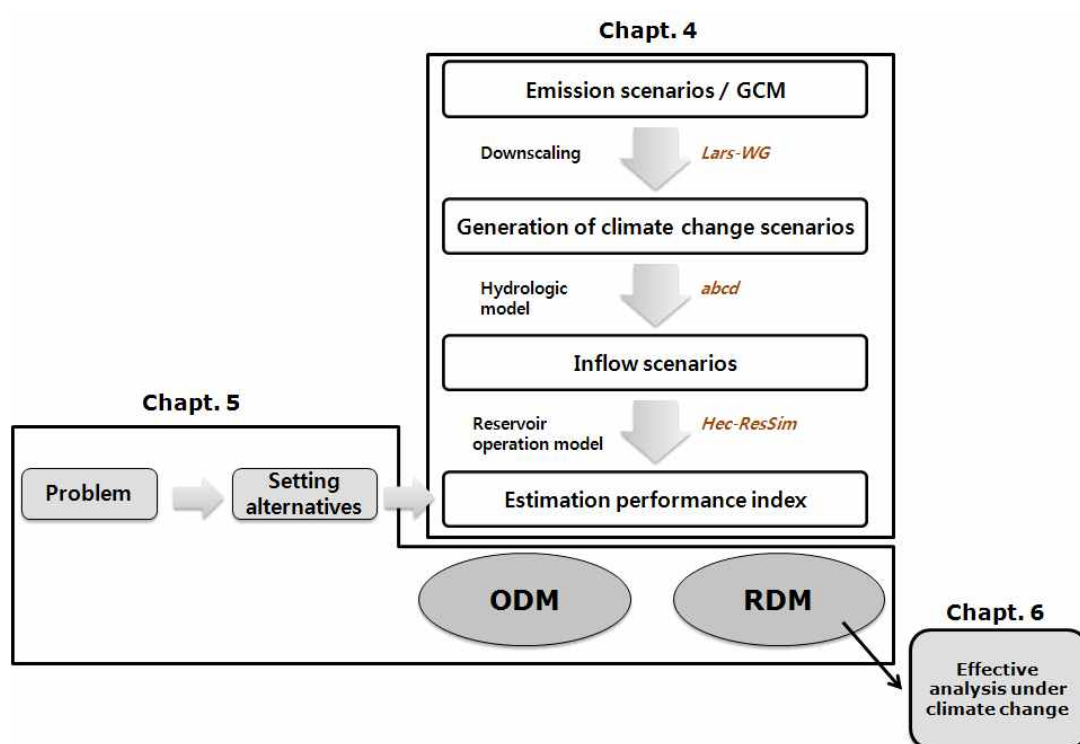


Figure 4.1 Research flow chart

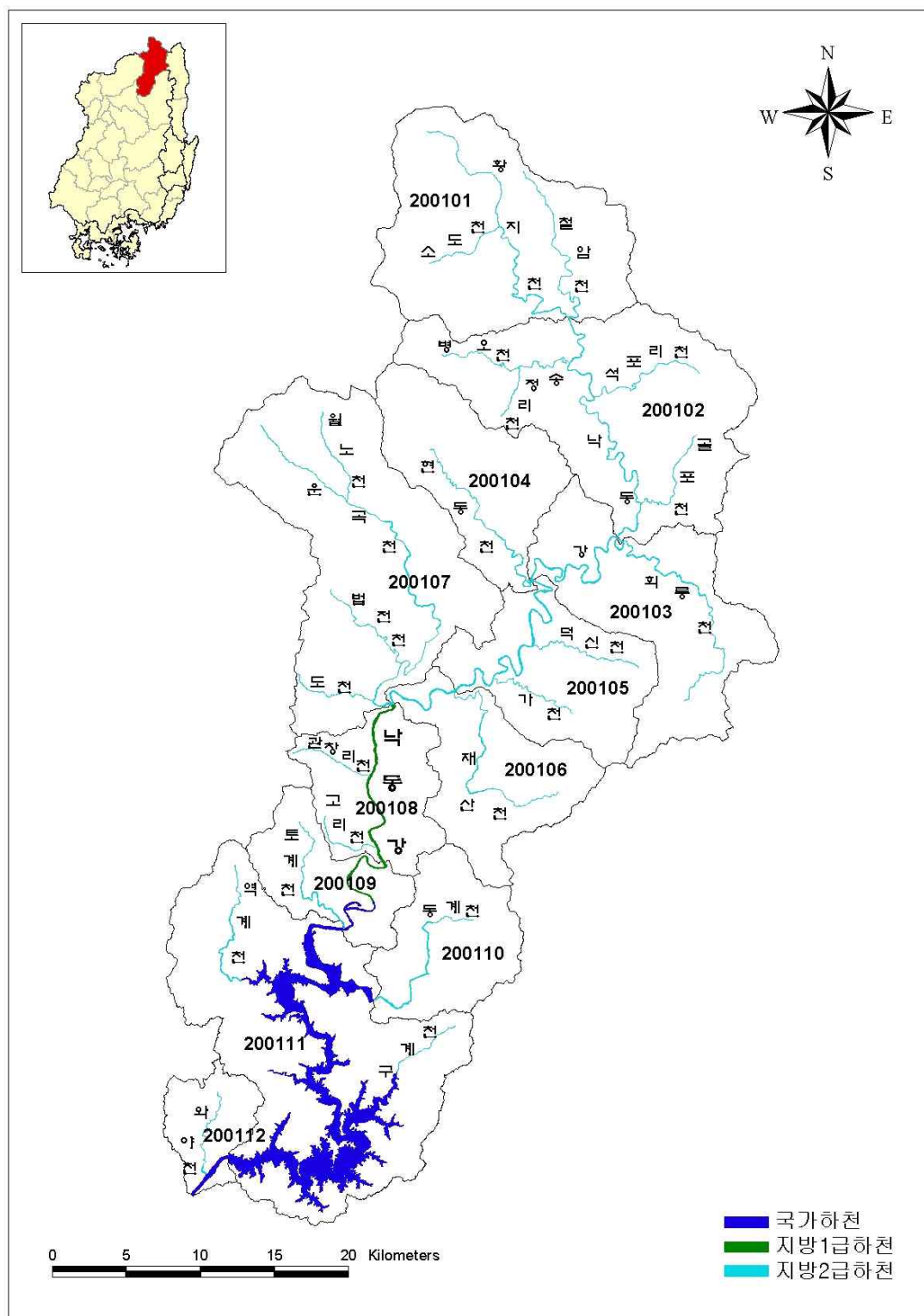


Figure 4.2 Andongdam basin map

동댐은 경북 안동시 와룡면 중가구리에 위치한 다목적댐으로서 1976년 준공되었고 높이 83 m, 길이 612 m의 락필댐 형식의 다목적댐으로서, 유역면적은 1,584 km² 이고, 계획홍수위는 EL.162.5 m이며, 총저수용량은 1,248×106 m³ 이다(건설교통부, 2004).

임하댐 중권역은 낙동강유역 북동쪽 사이에 위치하며 경상북도 청송군, 안동시, 영양군, 포항시의 1도 4군을 포함하고 있다. 유역면적은 낙동강 대권역의 8.3 %에 해당하는 1,975.77 km²이고, 유로연장은 112.75 km, 최원유로연장은 113.01 km이다. 유역둘레는 320.24 km이고, 유역의 평균폭은 17.48 km, 유역평균표고는 EL.388.4 m, 유역평균경사는 40.26 %이다(Figure 4.3). 임하댐은 경북 안동시 임하면 망천리, 좌안 경북 안동시 임하면 임하리에 위치한 다목적댐으로서 반변천 상류 18 km지점에 위치하고 있으며 1993년 준공되었고 높이 73.0 m, 길이 515.0 m의 락필댐형식의 다목적댐으로서, 유역면적은 1,361 km² 이며, 계획홍수위는 EL.164.7 m이며 총저수용량은 595 x 106 m³이다(건설교통부, 2004).

임하댐은 안동댐에 비해 상대적으로 유입량이 부족하고 댐 용량이 작아 계획용수공급량을 만족시키는데 어려움이 있다. 그 이유는 유역의 형태가 세로로 동쪽에서부터 서쪽으로 유량이 흘러내려오기 때문에 도달시간이 짧으며 홍수기에는 불필요한 방류량이 발생하기 때문이다. 이는 홍수기에 저류시킬 수 있는 수량에도 영향을 미쳐 이수기의 수량 부족으로 이어진다. 두 유역의 위치를 살펴보면 임하댐 하류는 안동댐 하류와 다른 자연유출에 거의 간섭받지 않은 채로 만나는 것을 볼 수 있는데 이는 두 댐을 연계운영을 하기에 적합한 형태이다. 만약 안동-임하댐을 연계 운영 한다면 상대적으로 풍부하고 안정적인 수량을 확보하고 있는 안동댐이 임하댐의 수량을 원조하여 임하댐의 용수공급부족량 등을 개선할 수 있을 것이다. 실질적으로 ‘4대강 살리기 마스터 플랜’에서 국토해양부(2009)는 안동-임하댐의 연결공사를 계획하였고 현재 공사가 본격적으로 시행되고 있다. 본 논문은 이러한 배경 하에 있는 안동댐 유역과 임하댐 유역을 함께 대상유역으로 삼아 연구를 시행하였다.

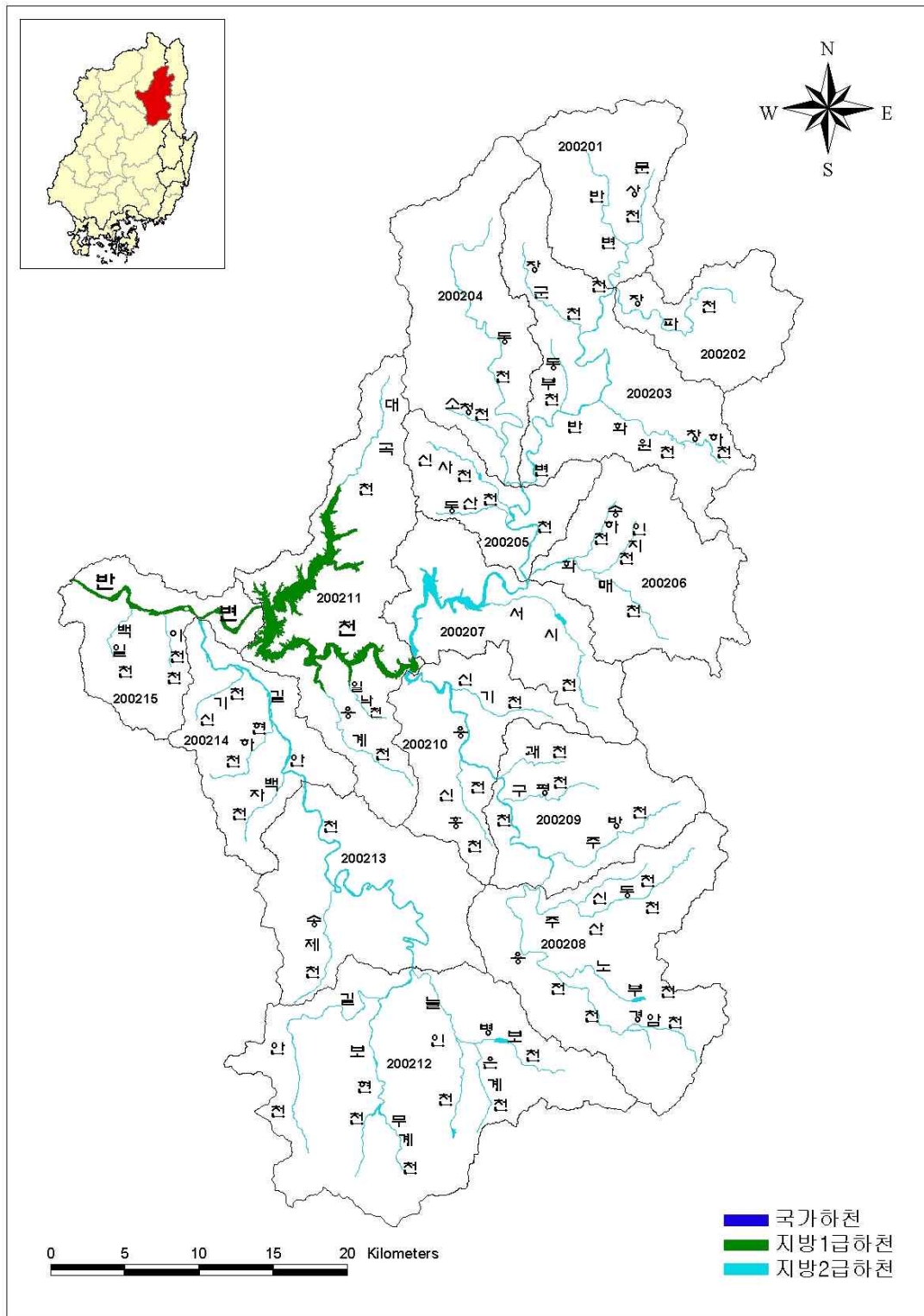


Figure 4.3 Imhadam basin map

4.2 기상 및 유량 시나리오 작성

4.2.1 배출시나리오와 GCM 선정 및 상세화

가능한 다양한 상태의 기후변화 시나리오를 반영하기 위하여 IPCC 4차 보고서에서 제시된 배출시나리오 A1B, B1, A2를 기반으로 모의된 12개의 GCM을 조합하여 SCN1 ~ SCN25의 25개 기상 시나리오를 작성하였다. 배출시나리오와 GCM의 선정기준은 최근 가장 활발히 사용되고 있는 기후변화 상세화 모형인 LARS-WG 5.0에 적용할 수 있는 Table 4.1의 리스트를 기초하였다. Table 4.1를 살펴보면, LARS-WG 5.0은 배출시나리오 A1B, B1, A2와 15개의 GCM모형에 대해 모의가 가능하다. 본 장에서 최종적으로 사용한 배출시나리오와 GCM은 Table 4.2와 같이 배출시나리오 A1B에서 10개, B1에서 10개, A2에서 5개의 GCM로 25개이다.

LARS-WG 5.0을 이용하여 안동댐 유역과 임하댐 유역의 각각 25개의 미래 기상시나리오를 작성하였다. 입력 자료는 안동댐 유역의 경우 안동(AD), 태백(TB), 의성(ES), 울진(UJ) 관측소, 임하댐 유역은 울진(UJ), 영천(YC), 영덕(YD), 영주(YJ) 관측소의 월 강우량과 기온 자료를 사용하였다(Table 4.3). 관측 개시시점은 안동은 1983년 1월, 태백은 1986년 1월, 의성은 1973년 1월, 울진은 1972년 1월, 영천과 영덕, 영주는 1973년 1월로 과거 25 ~ 38년간의 월 강우량과 월 기온 자료를 사용하였다.

유량 모의에 사용될 월 잠재증발산량과 강우량을 LARS-WG 5.0에 내장되어 있는 default seed number를 이용하여 각 관측점에 대해 모의하였다. 생성된 값은 안동댐과 임하댐 유역의 면적 평균값으로 전환하기 위하여 박준형(2012)이 산정한 관측소 별 티센계수를 이용하여 계산하였으며 그 값은 Table 4.3과 같다. 안동댐 유역의 경우 태백, 안동, 울진, 영주의 순으로 유역 면적에 가장 많은 비율을 차지하고 있으며, 임하댐 유역의 경우 영덕, 의성, 영천, 울진의 크기순으로 영향을 준다. 각 유역

Table 4.1 Global climate models from IPCC AR4 incorporated into the LARS-WG stochastic weather generator version 5.0. (Semenov et al., 2010)

Research center	Country	Model	Grid resolution	Emission scenarios
Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation	Australia	CSMK3	$1.9 \times 1.9^\circ$	SRA1B, SRB1
Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis	Canada	CGMR	$2.8 \times 2.8^\circ$	SRA1B
Institute of Atmospheric Physics	China	FGOALS	$2.8 \times 2.8^\circ$	SRA1B, SRB1
Centre National de Recherches Meteorologiques	France	CNCM3	$1.9 \times 1.9^\circ$	A1B, A2
Institute Pierre Simon Laplace	France	IPCM4	$2.5 \times 3.75^\circ$	SRA1B, SRA2, SRB1
Max-Planck Institute for Meteorology	Germany	MPEH5	$1.9 \times 1.9^\circ$	SRA1B, SRA2, SRB
National Institute for Environmental Studies	Japan	MIHR	$2.8 \times 2.8^\circ$	SRA1B, SRB1
Bjerknes Centre for Climate Research	Norway	BCM2	$1.9 \times 1.9^\circ$	SRA1B, SRB1
Institute for Numerical Mathematics	Russia	INCM3	$4 \times 5^\circ$	SRA1B, SRA2, SRB1
UK Meteorological Office	UK	HADCM3	$2.5 \times 3.75^\circ$	SRA1B, SRA2, SRB1
		HADGEM	$1.3 \times 1.9^\circ$	SRA1B, SRA2
Geophysical Fluid Dynamics Lab	USA	GFCM21	$2.0 \times 2.5^\circ$	SRA1B, SRA2, SRB1
			$2.0 \times 2.5^\circ$	
Goddard Institute for Space Studies	USA	GIAOM	$3 \times 4^\circ$	SRA1B, SRB1
National Centre for Atmospheric Research	USA	NCPCM	$2.8 \times 2.8^\circ$	SRA1B, SRB1
		NCCCS	$1.4 \times 1.4^\circ$	SRA1B, SRA2, SRB1

Table 4.2 Selected emission scenarios and GCMs

Scenario index	Emission Scenario	GCM
SCN1	A1B	BCM2
SCN2	A1B	CGMR
SCN3	A1B	CNCM3
SCN4	A1B	CSMK3
SCN5	A1B	FGOALS
SCN6	A1B	GFCM21
SCN7	A1B	GIAOM
SCN8	A1B	HADCM3
SCN9	A1B	INCM3
SCN10	A1B	IPCM4
SCN11	B1	BCM2
SCN12	B1	CSMK3
SCN13	B1	FGOALS
SCN14	B1	GFCM21
SCN15	B1	GIAOM
SCN16	B1	HADCM3
SCN17	B1	INCM3
SCN18	B1	IPCM4
SCN19	B1	MIHR
SCN20	B1	MPEH5
SCN21	A2	CNCM3
SCN22	A2	GFCM21
SCN23	A2	HADCM3
SCN24	A2	INCM3
SCN25	A2	IPCM4

Table 4.3 Stations for Andongdam and Imhadam and Thissen coefficient (Park, 2011)

Station	Basin	Thissen coefficient	Start for observation	Period of observed data (Year)
AD	Andongdam	0.3609	1983.1	28
TB	Andongdam	0.5253	1986.1	25
ES	Imhadam	0.3987	1973.1	38
UJ	Andongdam	0.0807	1972.1	39
	Imhadam	0.0538		
YC	Imhadam	0.0626	1973.1	38
YD	Imhadam	0.4549	1973.1	38
YJ	Andongdam	0.0331	1973.1	38

의 관측치의 면적 평균값은 안동댐의 경우 1986년 1월부터 2010년 12월의 기간이며, 임하댐의 경우는 1992년 1월부터 2010년 12월이다. 최종적으로 관측 기간에 대하여 안동댐 유역과 임하댐 유역의 면적 평균값으로 환산된 월 누적 강우량은 Figure 4.4와 Figure 4.5와 같다. 안동댐 유역인 Figure 4.4를 보면 2002년 8월에 월 누적 강우량이 703 mm로 최고치를 기록했고, 임하댐 유역의 경우인 Figure 4.5를 살펴보면 2006년 7월 월 누적 강우량이 약 639 mm로 가장 높은 것을 확인할 수 있다.

미래 기간인 2011 ~ 2100년의 모의 결과, 안동댐 유역과 임하댐 유역의 면적 평균 월 잠재증발산량과 누적 강우량이 25개의 기후변화 시나리오에 대해 최종적으로 생성되었다. 월 누적 강우량의 결과는 안동댐 유역의 경우 Figure 4.6 ~ 4.8, 임하댐 유역의 경우는 Figure 4.9 ~ 4.11로 2020s(2011 ~ 2040), 2050s(2041 ~ 2070), 2080s(2071 ~ 2100)으로 30년씩 세 개의 기간으로 나누어 25개의 시나리오를 나타냈다. 각 그래프의 가로축은 연도와 월을 나타내고 세로축은 월 누적 강우량을 의미하며 단위는 mm이다. 안동댐 유역의 경우는 모든 시나리오에 대해 2020s 기간에서 638 mm로 최고치를 기록했고 2040s에서는 약 683 mm로 약 45 mm 증가하였으며, 2080s에서는 약 770 mm로 2020s보다 132 mm 증가한 것을 확인할 수 있었으며 미래로 갈수록 강우량의 전반적으로 늘어나는 것을 알 수 있다. 임하댐 유역의 경우는 모든 시나리오에 대해 2020s에서 최고치가 약 503 mm이고, 2040s에서는 약 607 mm로 104 mm가 증가하였으며 2080s에서는 약 672 mm로 2020s의 최고치에 비해 171 mm 늘어난 것을 확인할 수 있다. 임하댐 유역도 안동댐 유역과 마찬가지로 미래로 갈수록 전반적으로 강우량이 증가하는 것을 알 수 있다.

각 시나리오 별 2011년 1월부터 2100년 12월까지의 월 누적 강우량의 평균값을 산정하여 비교하면 Table 4.4과 같다. 안동댐 유역의 경우 SCN23에서 평균 116 mm로 가장 크고 그 다음으로는 SCN8에서 111 mm로 크다. 가장 작은 값은 SCN22에서 91 mm 이다. 임하댐 유역의

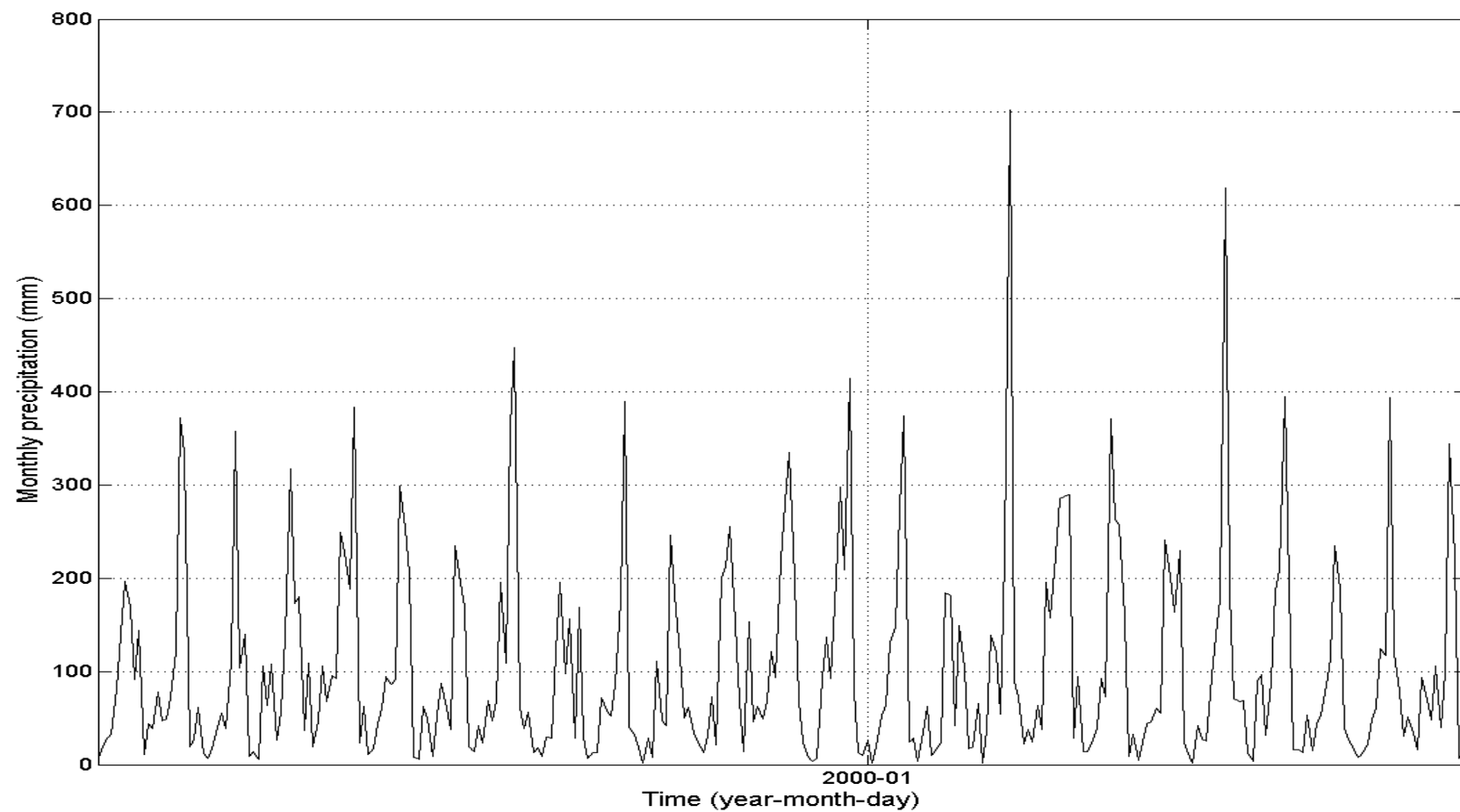


Figure 4.4 Monthly accumulated precipitation in Andongdam basin (Observed scenarios, 1986.1 ~ 2010.12)

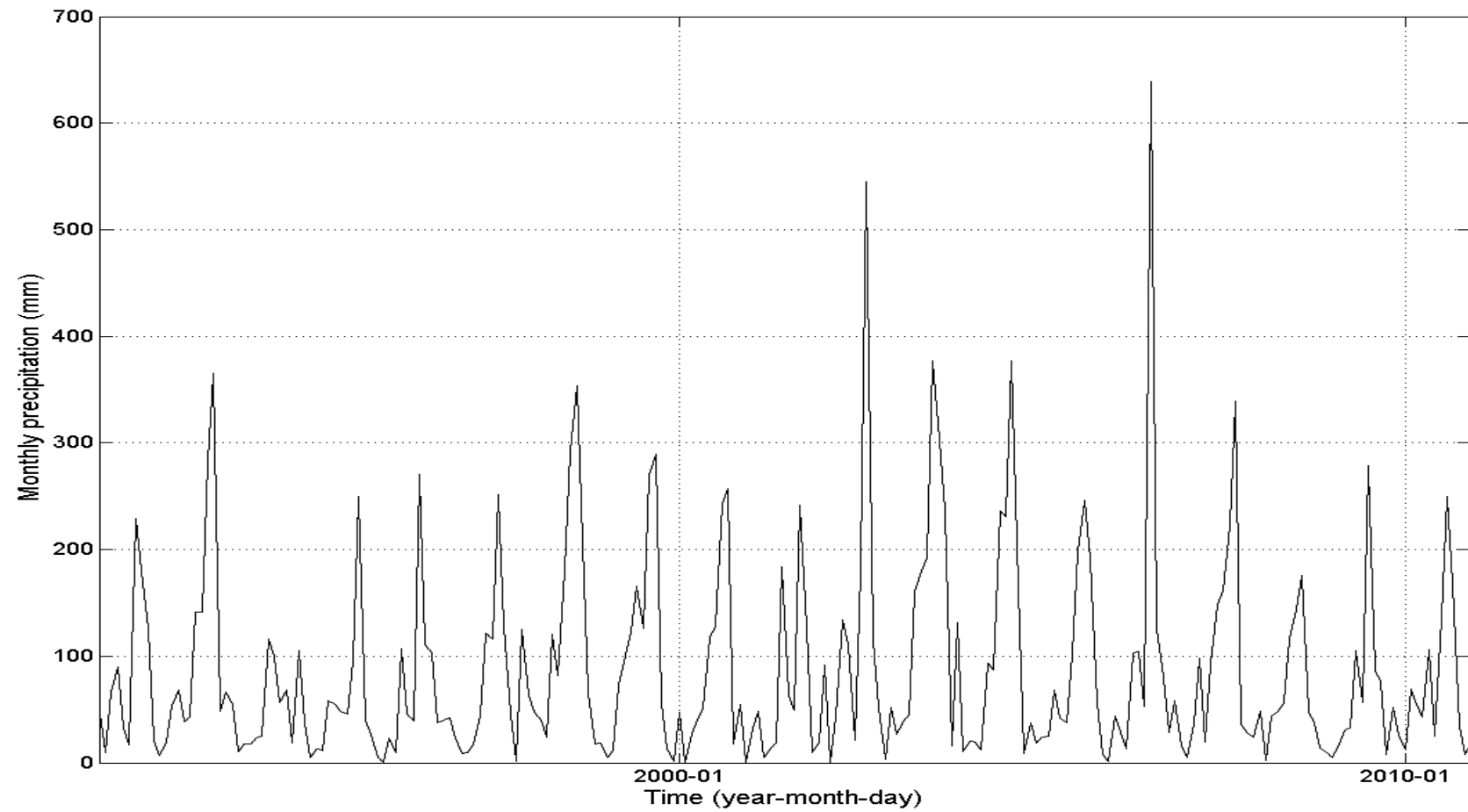


Figure 4.5 Monthly accumulated precipitation in Imhadam basin (Observed scenarios, 1992.1 ~ 2010.12)

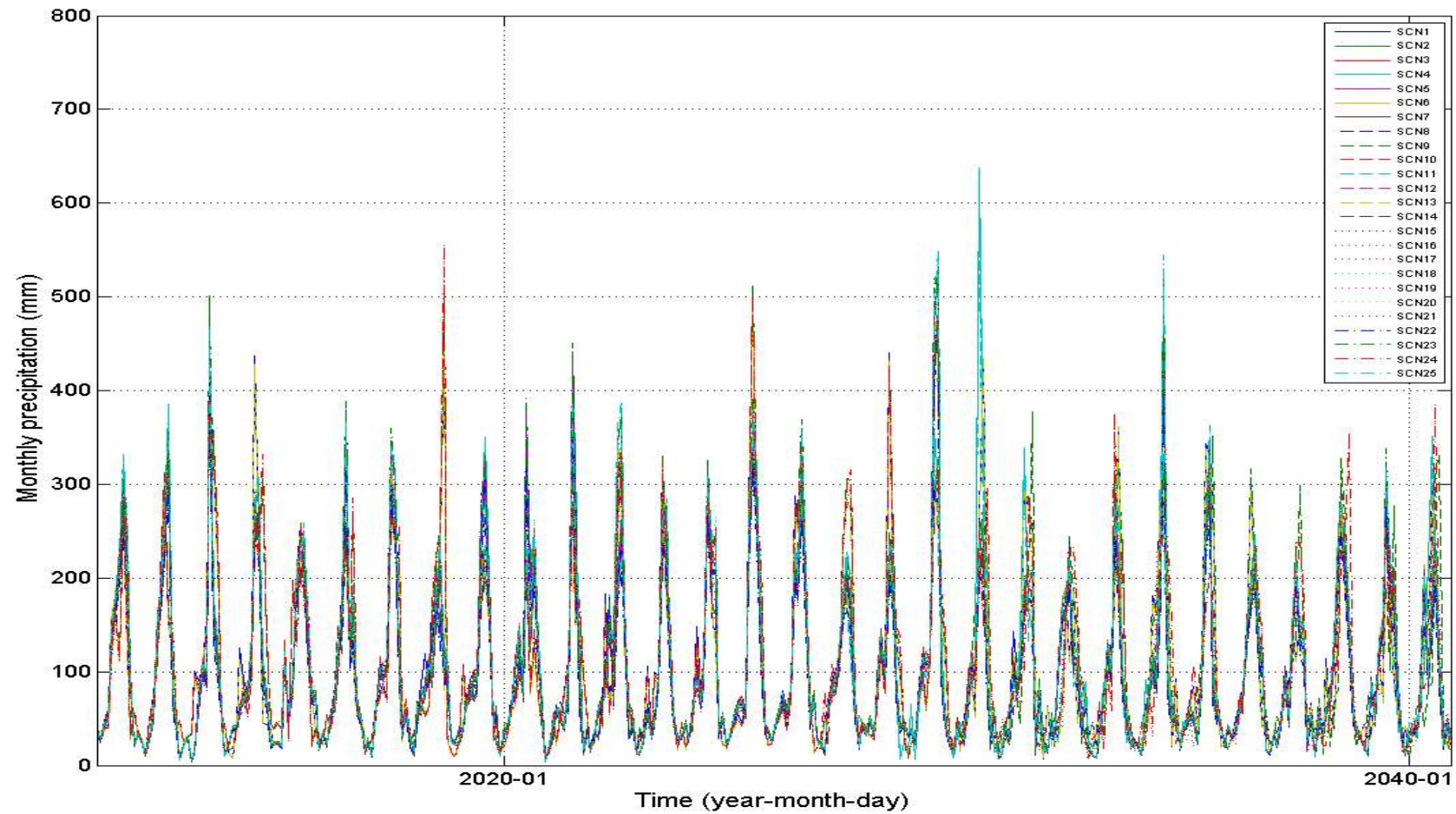


Figure 4.6 Monthly accumulated precipitation in Andongdam basin (SCN1 ~ SCN25, 2011.1 ~ 2040.12)

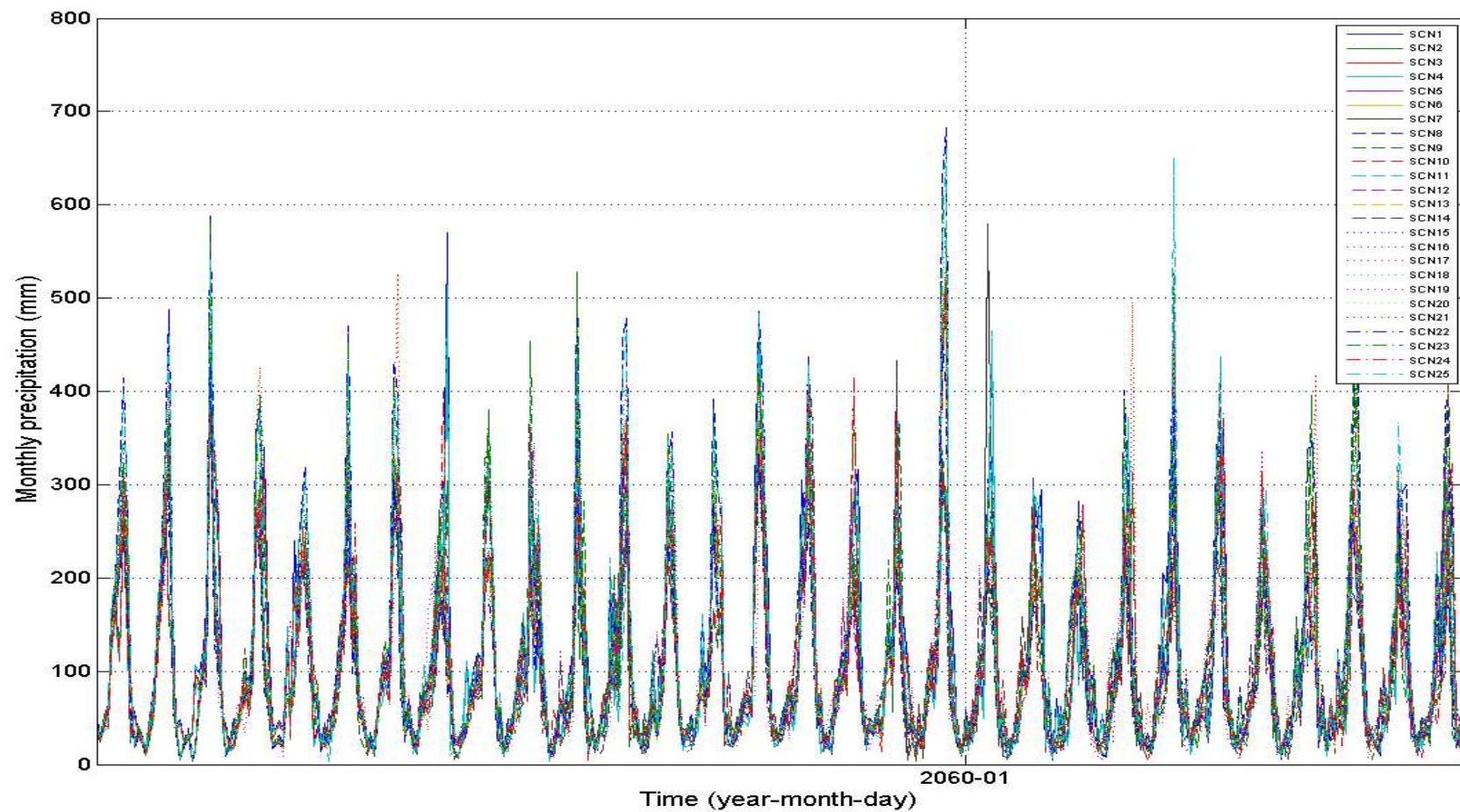


Figure 4.7 Monthly accumulated precipitation in Andongdam basin (SCN1 ~ SCN25, 2041.1 ~ 2070.12)

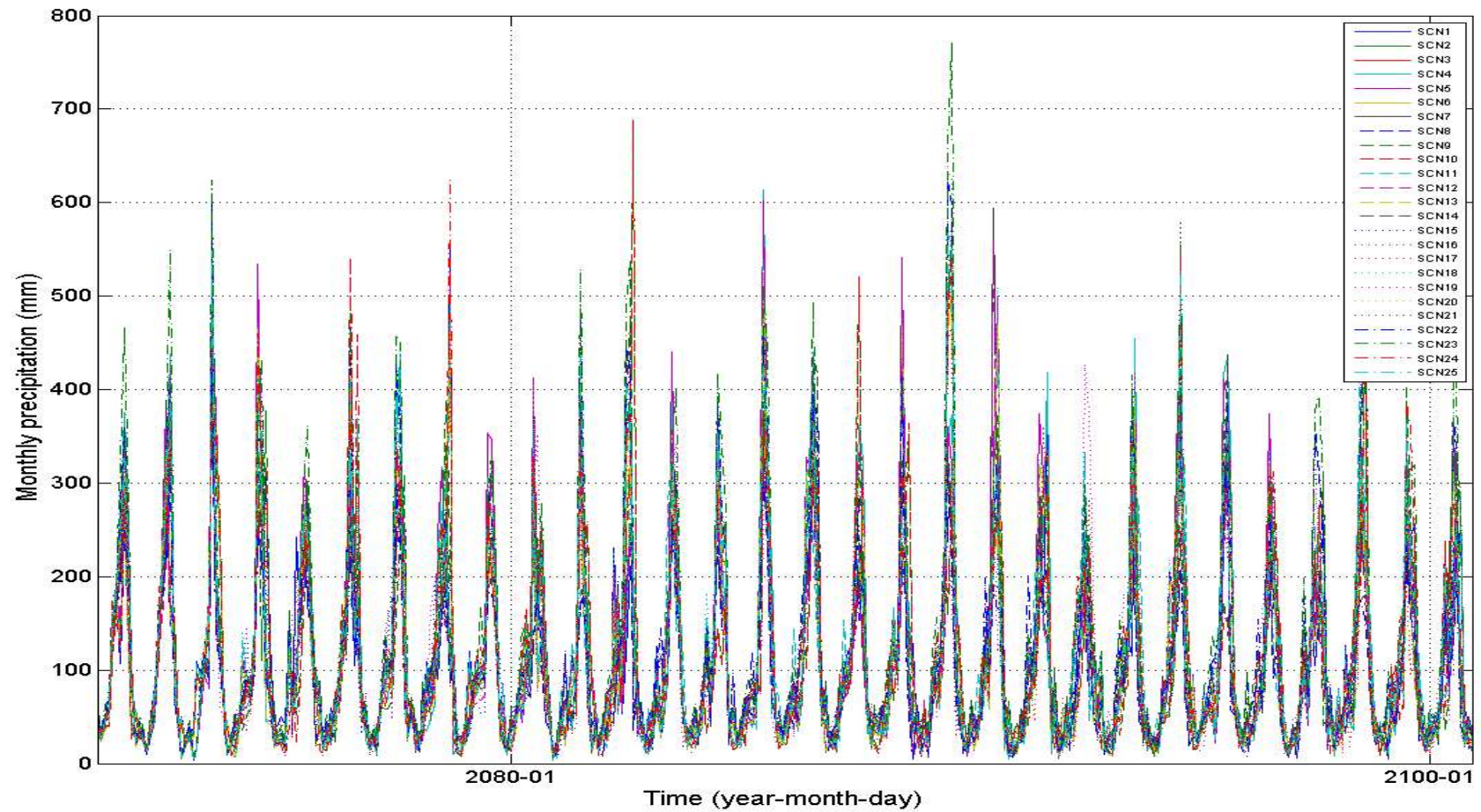


Figure 4.8 Monthly accumulated precipitation in Andongdam basin (SCN1 ~ SCN25, 2071.1 ~ 2100.12)

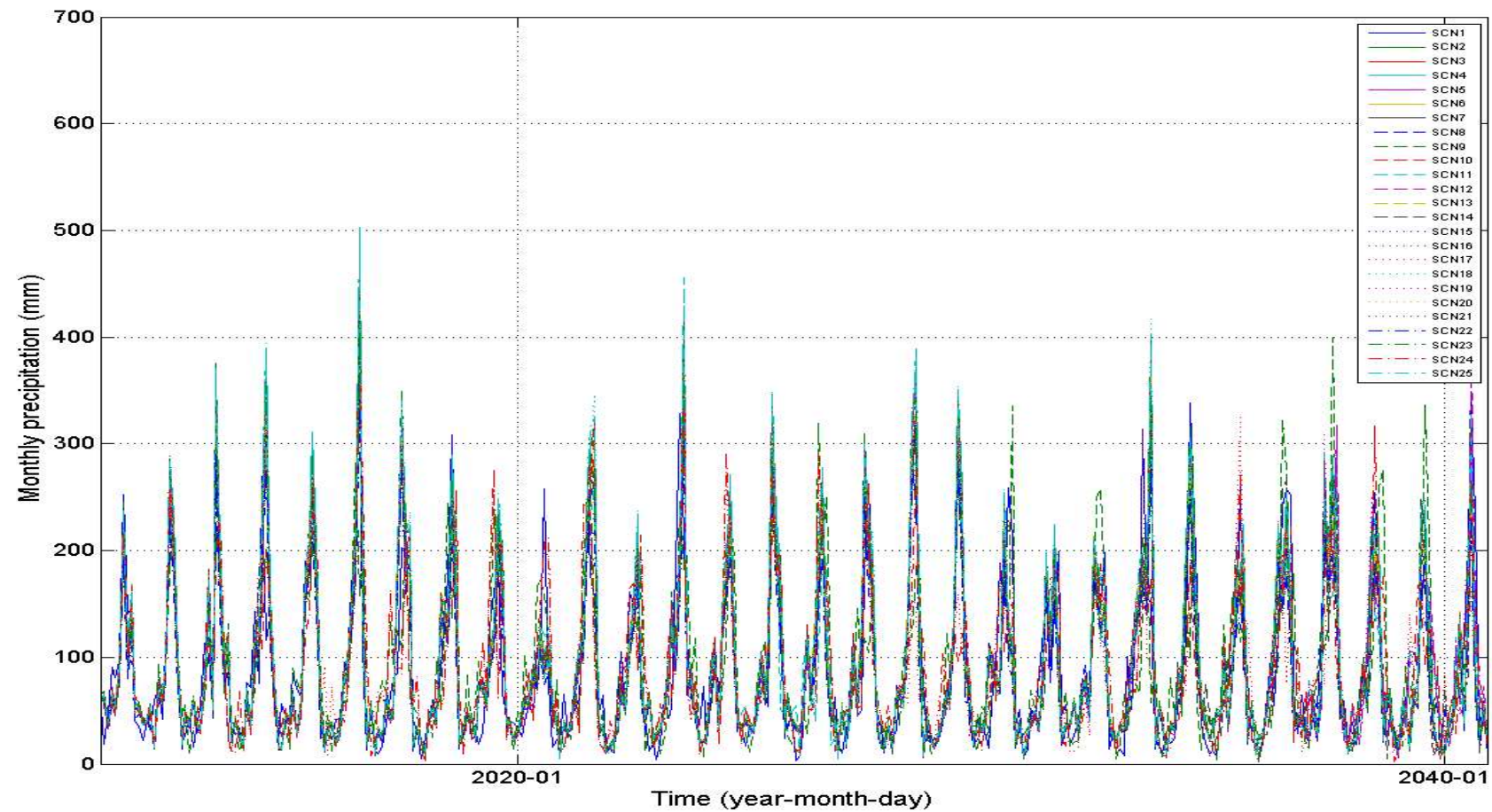


Figure 4.9 Monthly accumulated precipitation in Imhadam basin (SCN1 ~ SCN25, 2011.1 ~ 2040.12)

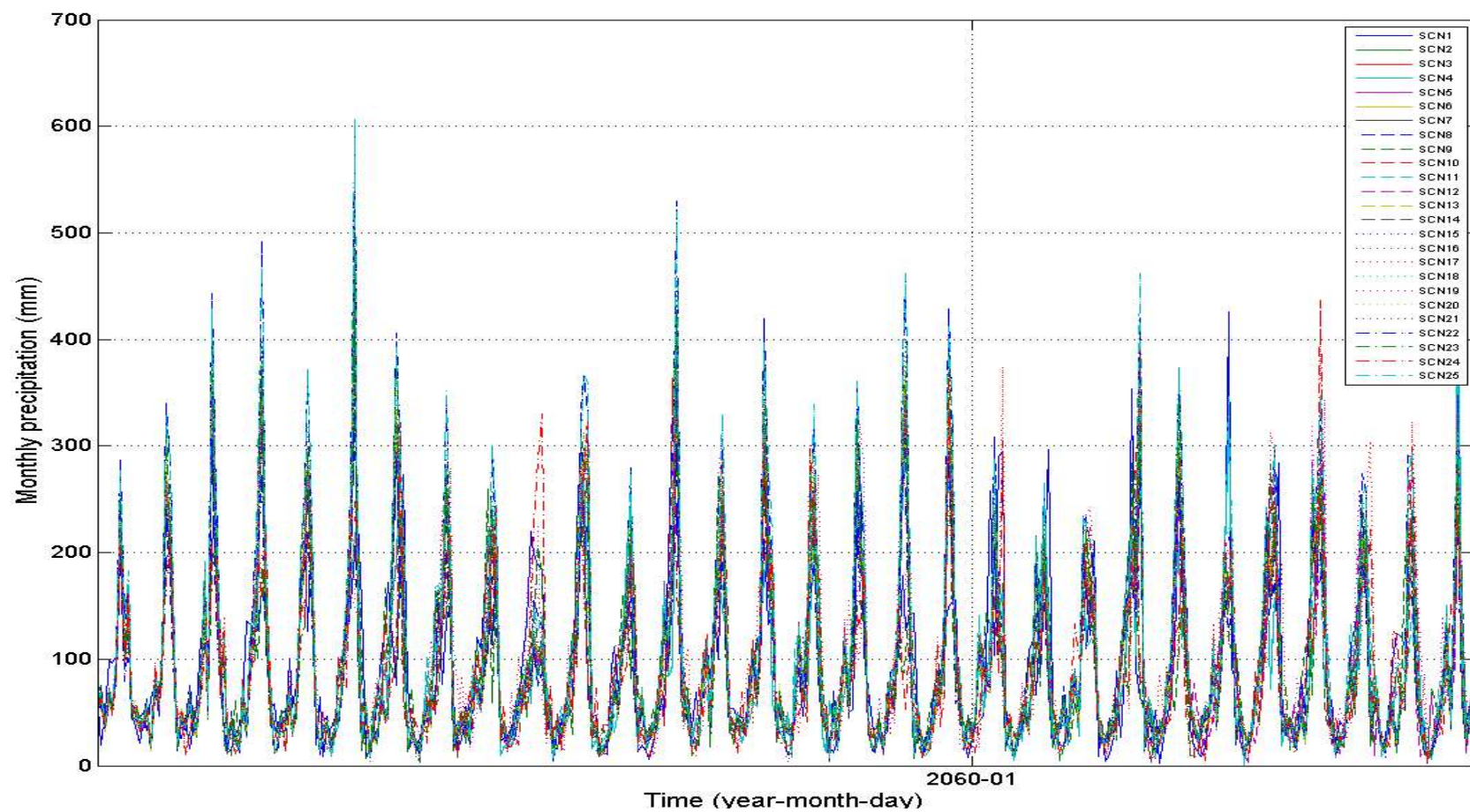


Figure 4.10 Monthly accumulated precipitation in Imhadam basin (SCN1 ~ SCN25, 2041.1 ~ 2070.12)

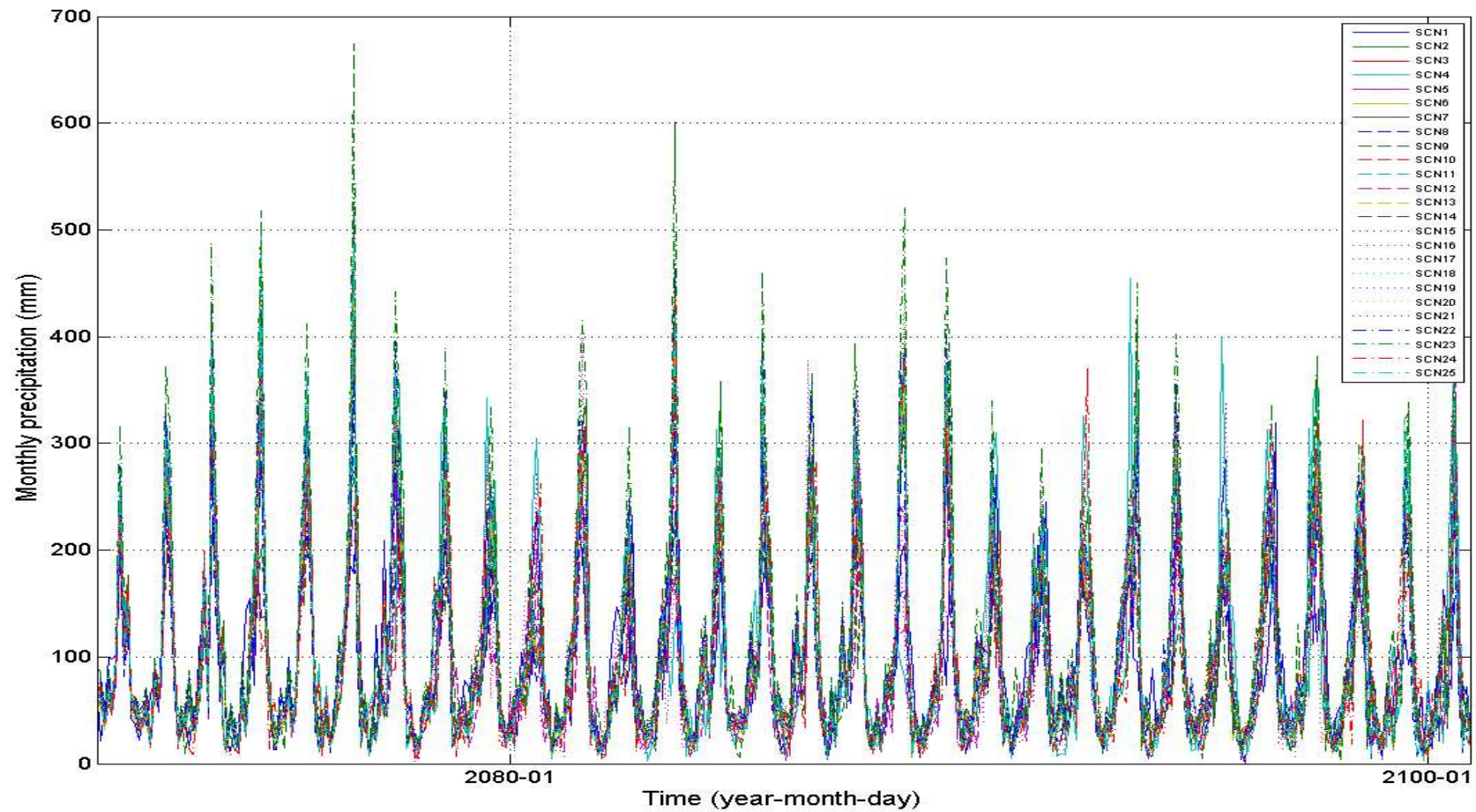


Figure 4.11 Monthly accumulated precipitation in Imhadam basin (SCN1 ~ SCN25, 2071.1 ~ 2100.12)

Table 4.4 Monthly average accumulated precipitation in Andongdam and Imhadam basins for future period

Scenario index	Monthly average precipitation (mm) (AD, 2011.1 ~ 2100.12)	Monthly average precipitation (mm) (IH, 2011.1 ~ 2100.12)
SCN1	105.88	90.12
SCN2	105.04	96.63
SCN3	99.11	90.39
SCN4	105.01	92.12
SCN5	102.88	90.85
SCN6	96.86	89.21
SCN7	95.74	85.68
SCN8	110.95	98.16
SCN9	103.54	86.72
SCN10	102.97	94.64
SCN11	101.88	88.96
SCN12	95.58	86.79
SCN13	99.56	87.65
SCN14	96.23	87.65
SCN15	95.70	86.64
SCN16	104.17	94.08
SCN17	102.76	86.48
SCN18	106.48	97.01
SCN19	102.63	92.29
SCN20	100.58	91.39
SCN21	98.13	89.65
SCN22	91.31	81.56
SCN23	115.78	102.75
SCN24	104.40	87.79
SCN25	109.95	101.27

경우는 안동댐 유역과 마찬가지로 SCN23에서 평균 103 mm로 가장 크고, 그 뒤로 SCN25가 101 mm로 큰 것을 알 수 있다. 가장 작은 값을 보이는 시나리오에는 안동댐 유역과 같이 SCN22로 82 mm를 나타낸다. Figure 4.12와 같이 시나리오 별 양상을 살펴보면 대체적으로 안동댐 유역의 값이 임하댐 유역의 값보다 높은 것을 알 수 있으며 시나리오 별 두 유역의 강수량 변동 추세가 비슷한 것을 확인 할 수 있다. 안동댐의 경우 최대치와 최소치의 편차가 25 mm, 임하댐의 경우 21 mm으로 시나리오 별 강수량의 격차가 두 유역 모두 상이하게 나는 것을 살펴볼 수 있다.

4.2.2 유량 시나리오 모의

안동댐과 임하댐의 미래 유입량을 모의하기 위해 본 장에서는 *abcd* 수문 모형을 사용하였다. 입력변수는 월 강수량과 월 잠재증발산량으로 4.2.1절에서 산정한 25개 시나리오 별 유역의 면적 평균값을 이용하였다. 유입량 산정하기 위한 *abcd* 모형의 매개변수는 박준형(2012)이 산정한 Table 4.5의 값을 사용하였다. 박준형(2012)은 안동댐 유역과 임하댐 유역을 대상으로 면적 평균한 관측 강수를 모형에 적용하여 댐의 관측 유입량과 비교해 시행착오법을 이용하여 모의 정확성을 확인하여 매개변수를 추적하였다.

Table 4.5의 추정된 매개변수를 이용해 각 유역의 관측치를 입력하여 월 유입량을 모의한 결과를 Figure 4.13과 Figure 4.14로 나타내었다. 각 그래프의 가로축은 연도와 월을 나타내고 세로축은 월 평균 유입량을 의미하며 단위는 CMS(cubic meters per seconds)이다. 안동댐의 관측기간은 1986년 1월부터 2012년 12월까지이고, 임하댐의 관측기간은 2011년 1월부터 2040년 12월까지이다. 안동댐의 경우 2006년 7월에 약 336 CMS로 최고치를 기록하며, 임하댐의 경우 2002년 8월에 약 264 CMS로 가장 큰 값을 보인다.

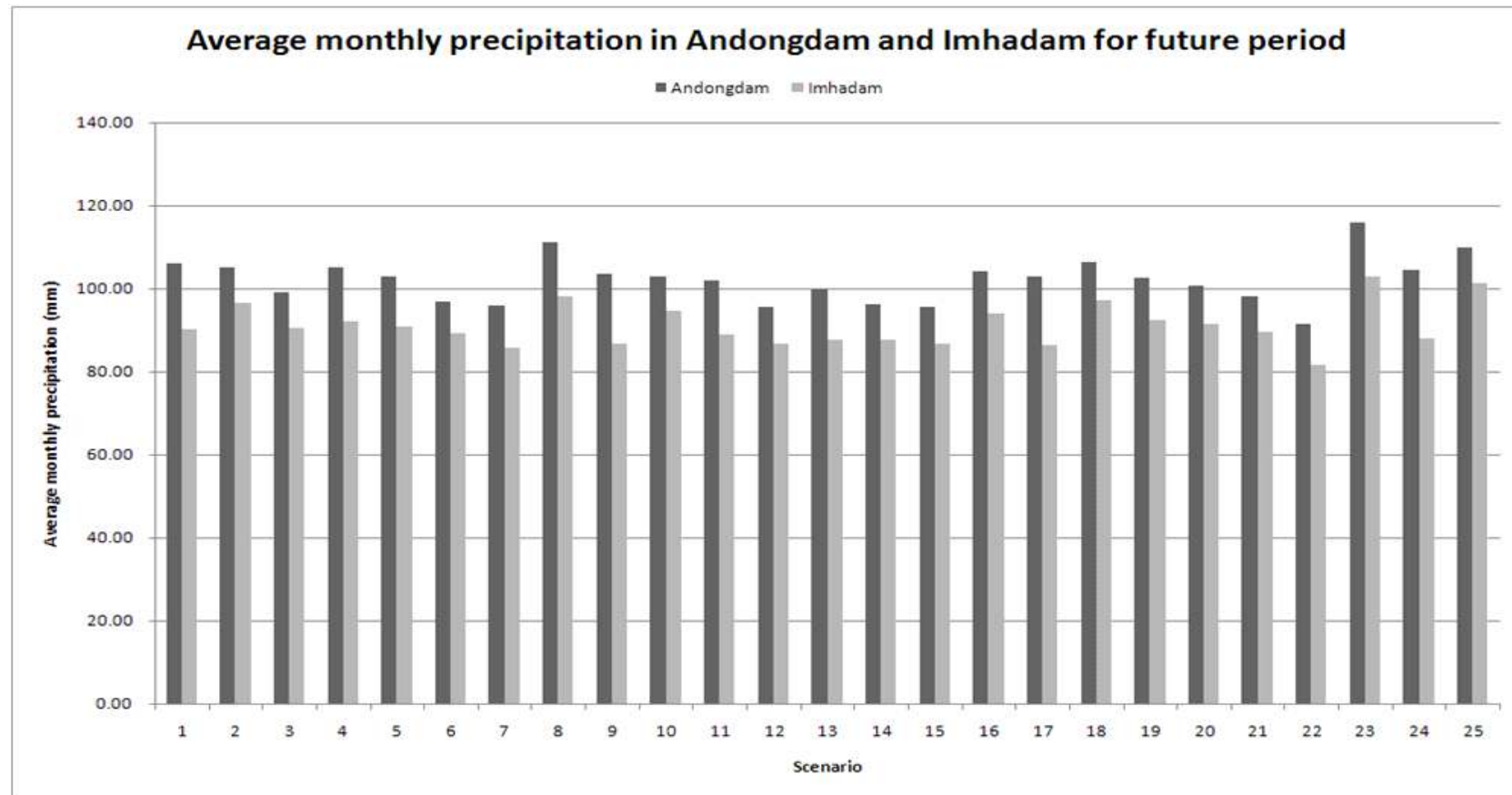


Figure 4.12 Monthly average accumulated precipitation in Andongdam and Imhadam for future period (SCN1 ~ SCN25, 2011.1 ~ 2100.12)

Table 4.5 Parameters of *abcd* model (Park, 2012)

Dam	Period	Parameter			
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>
Andong	1991. 1 ~ 2007. 12	0.94	400	0.00	0.57
Imha	1992. 1 ~ 2007. 12	0.98	252	0.10	0.02

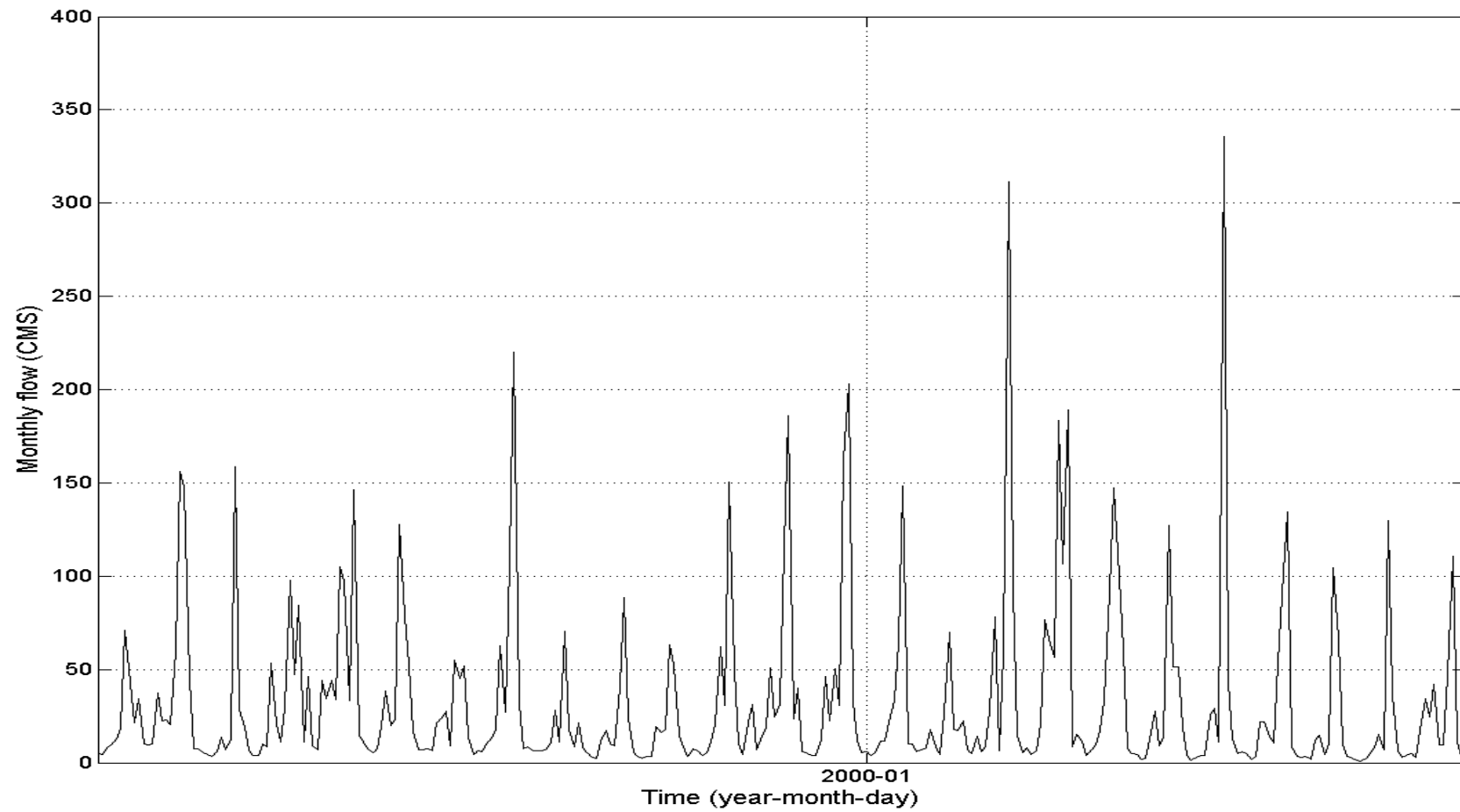


Figure 4.13 Monthly inflow in Andongdam (Observed scenario, 1986.1 ~ 2010.12)

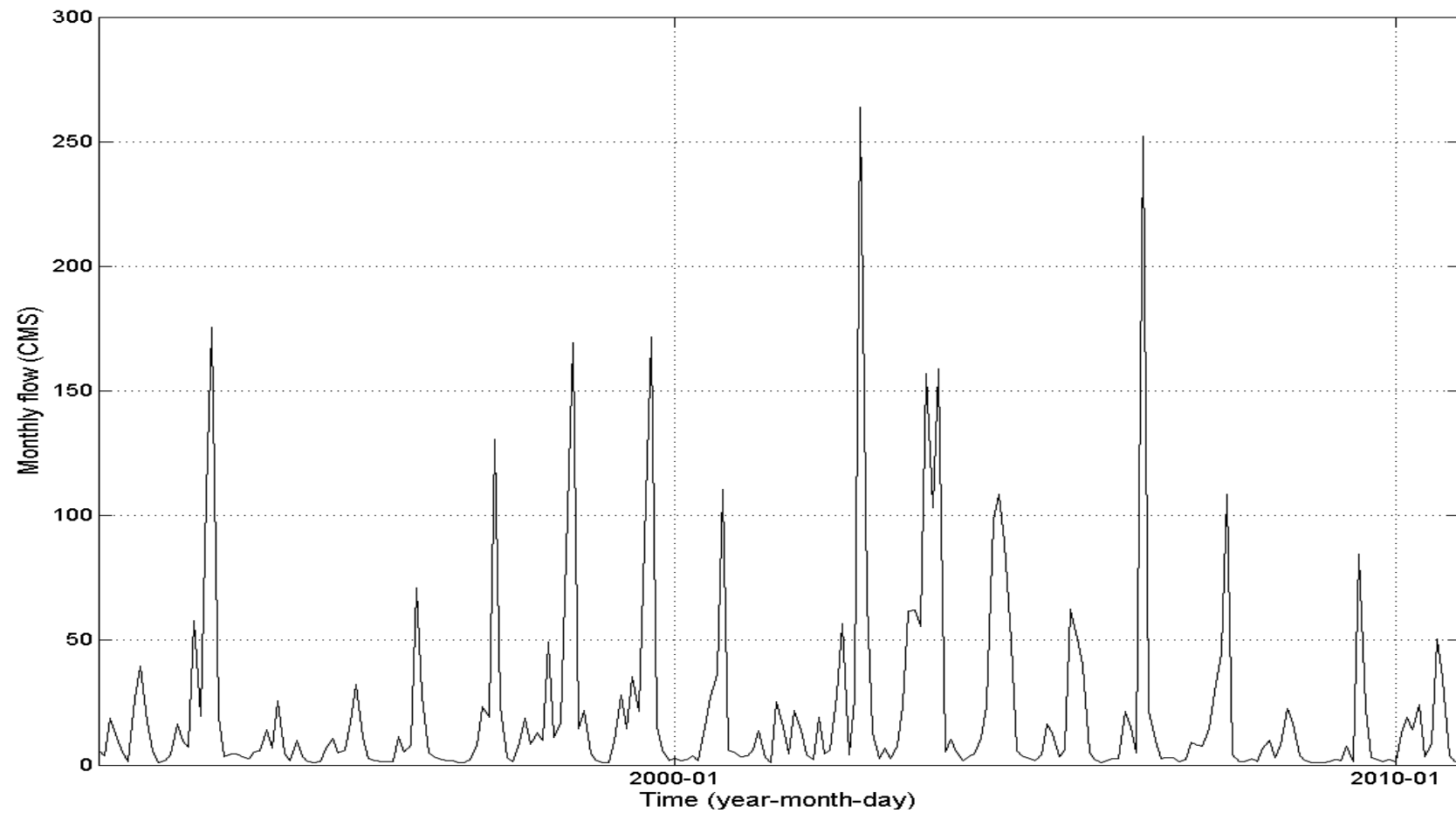


Figure 4.14 Monthly inflow in Imhadam (Observed scenario, 1992.1 ~ 2010.12)

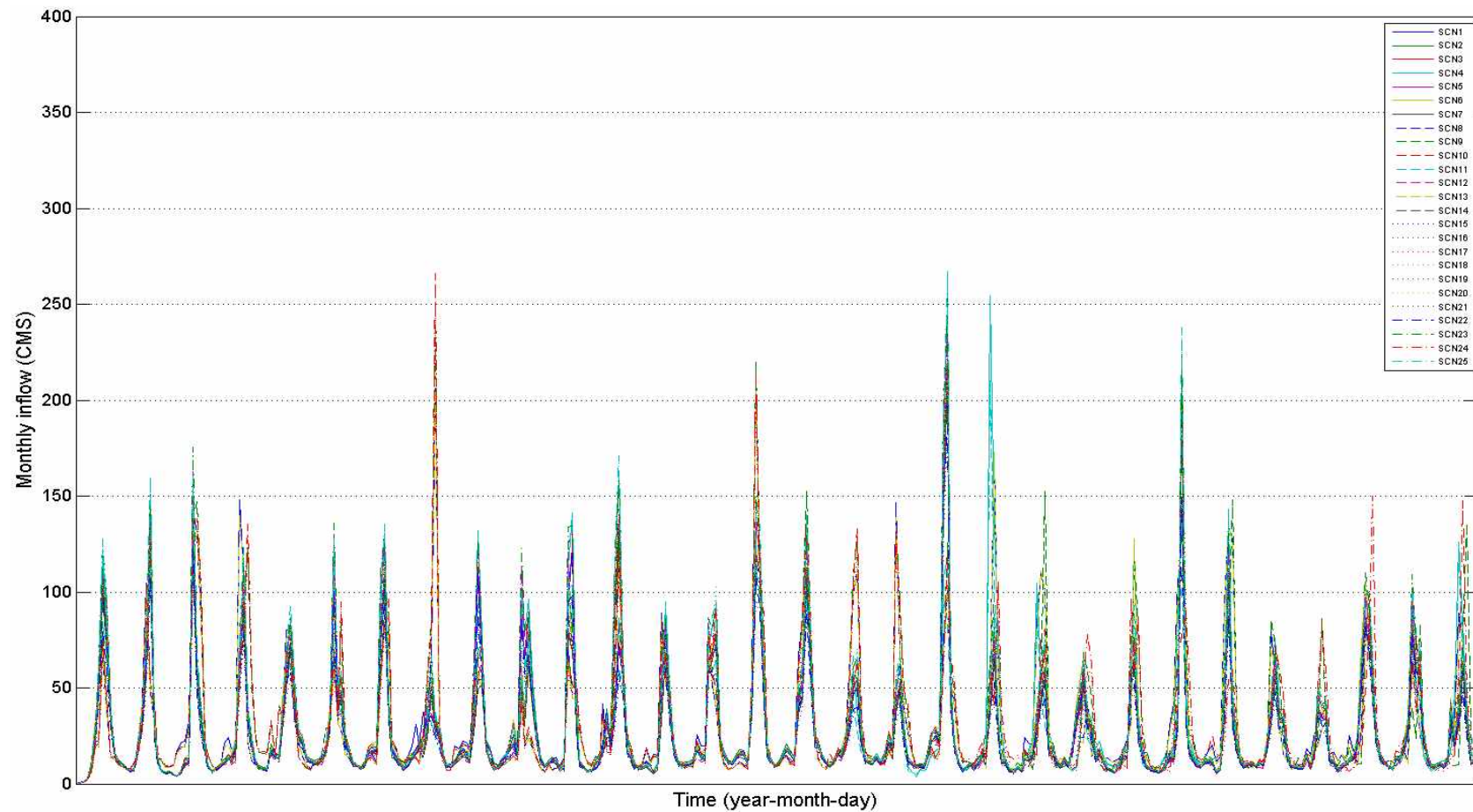


Figure 4.15 Monthly inflow in Andongdam (SCN1 ~ SCN25, 2011.1 ~ 2040.12)

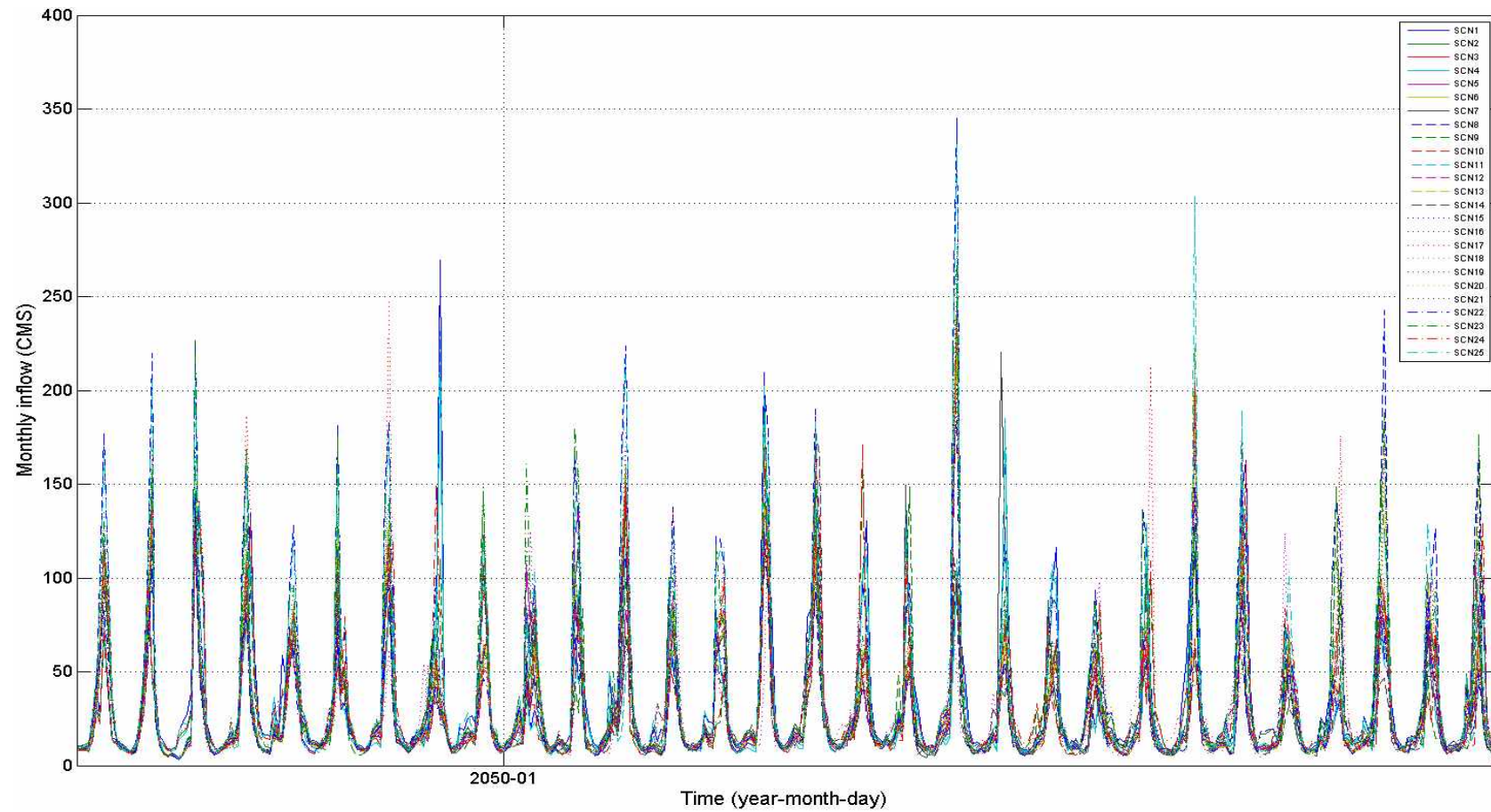


Figure 4.16 Monthly inflow in Andongdam (SCN1 ~ SCN25, 2041.1 ~ 2070.12)

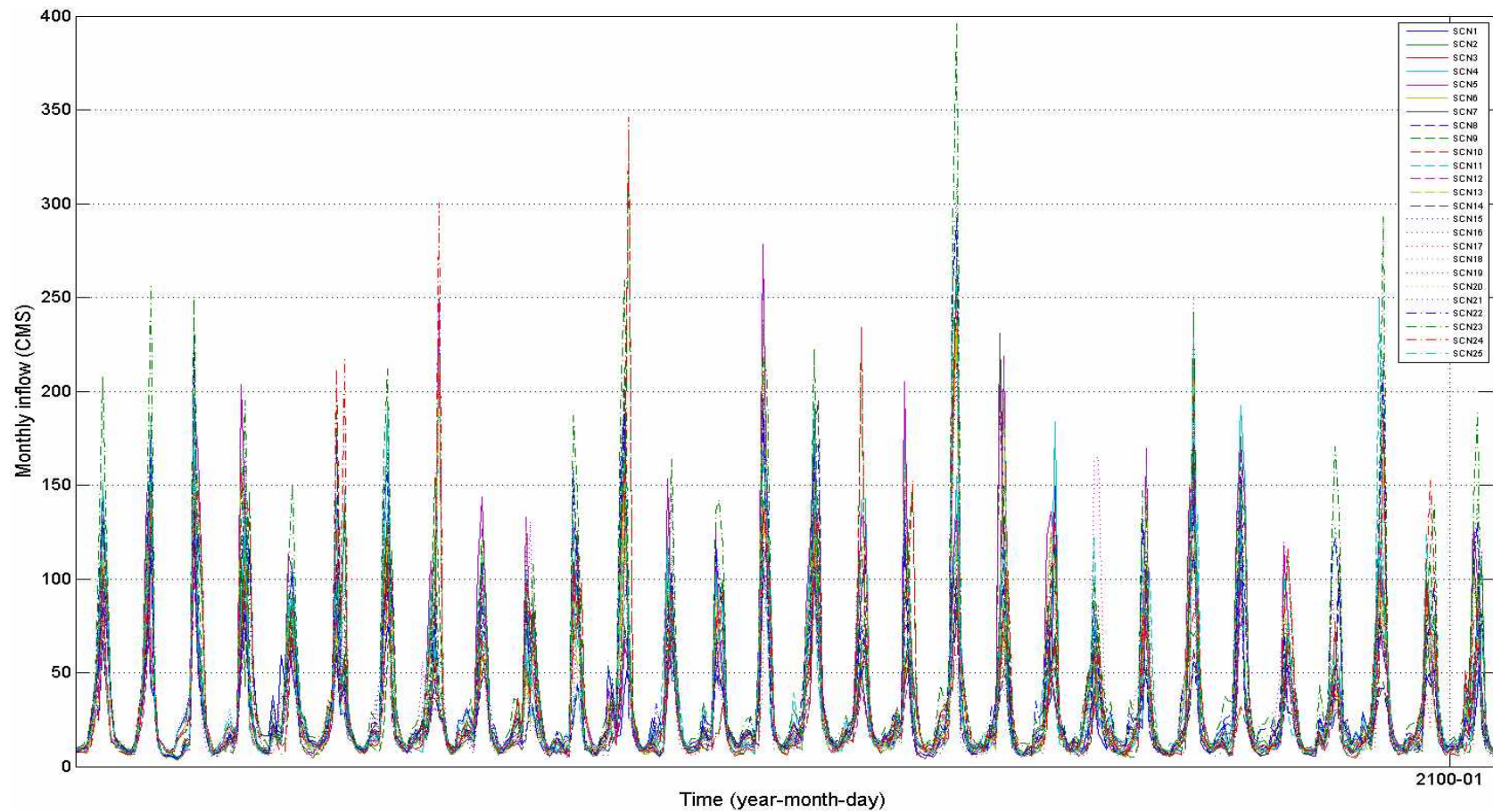


Figure 4.17 Monthly inflow in Andongdam (SCN1 ~ SCN25, 2071.1 ~ 2100.12)

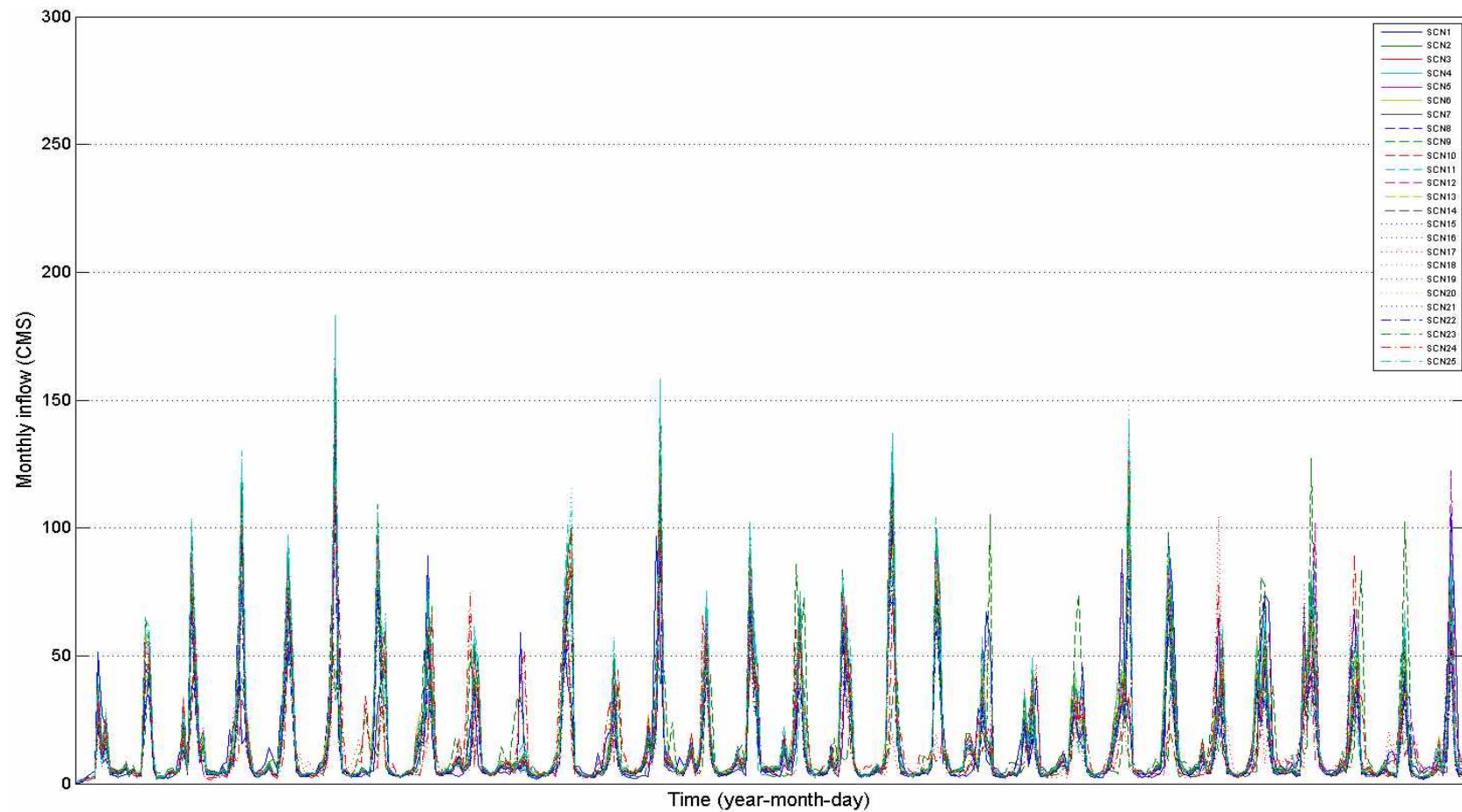


Figure 4.18 Monthly inflow in Imhadam (SCN1 ~ SCN25, 2011.1 ~ 2040.12)

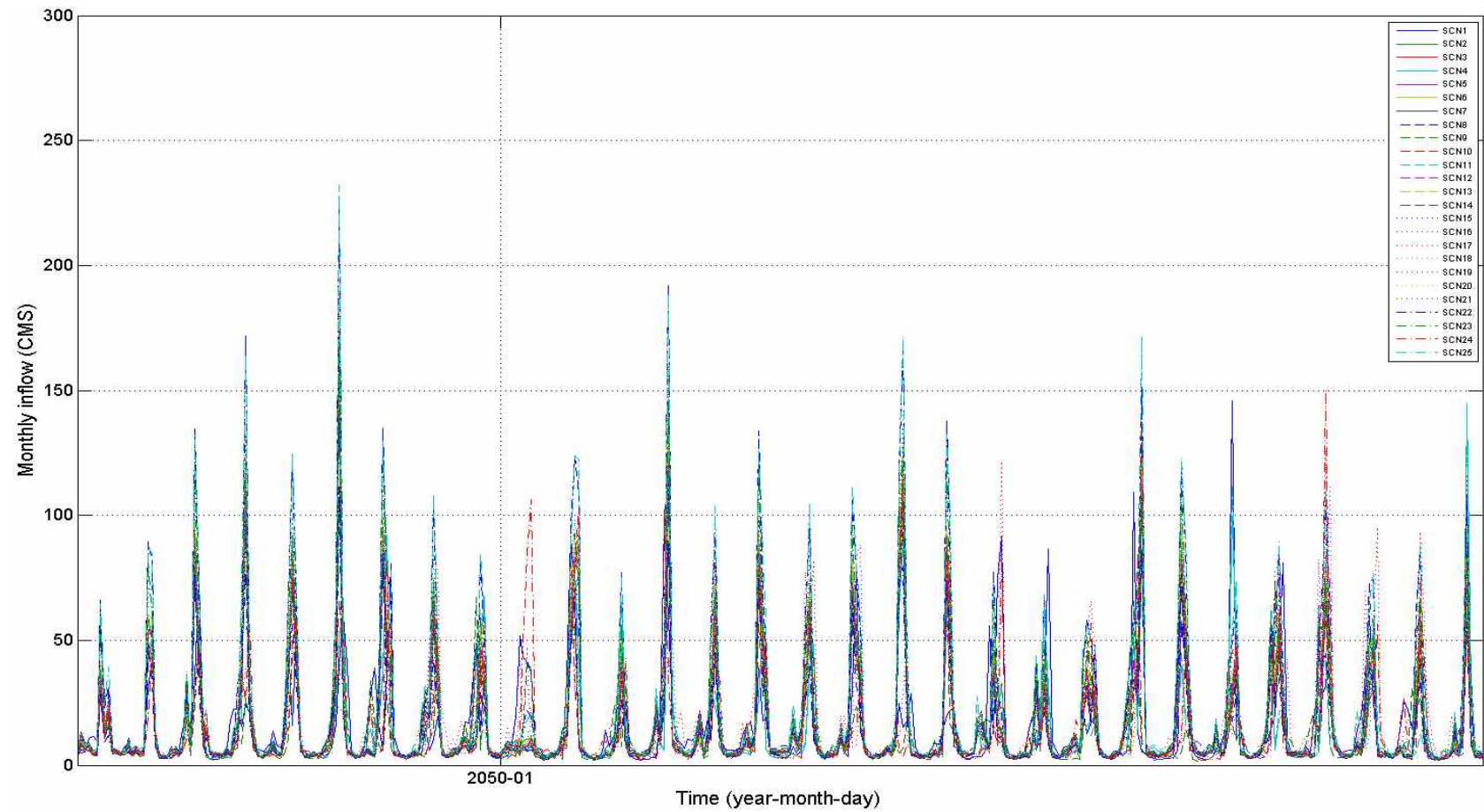


Figure 4.19 Monthly inflow in Imhadam (SCN1 ~ SCN25, 2041.1 ~ 2070.12)

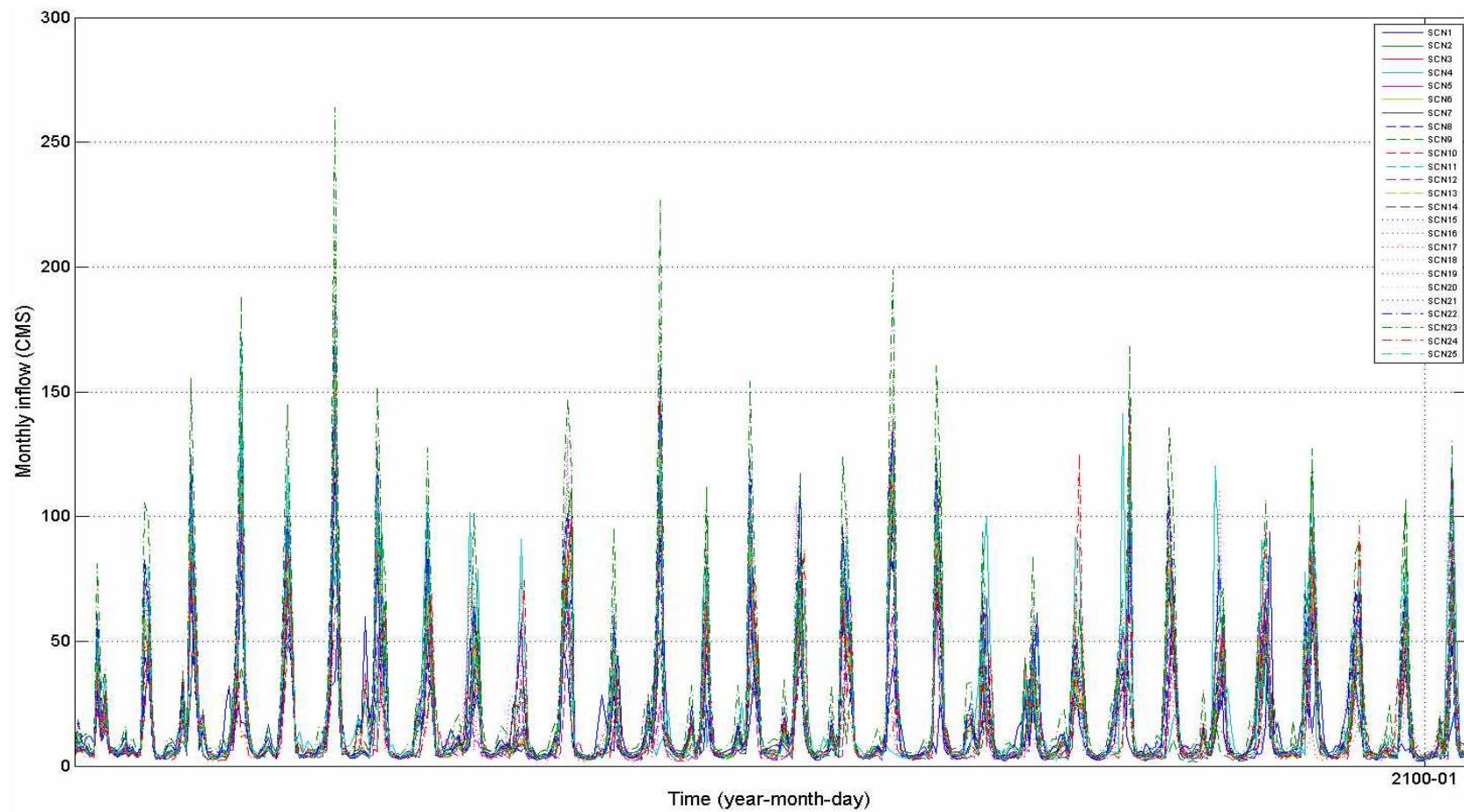


Figure 4.20 Monthly in Imhadam (SCN1 ~ SCN25, 2071.1 ~ 2100.12)

25개의 시나리오에 대한 2011 ~ 2100년 미래 유입량의 모의 결과는 안동댐의 경우 Figure 4.15 ~ 4.17이고, 임하댐의 경우 Figure 4.18 ~ 4.20로 최종적으로 모의하였다. 강수량 모의와 마찬가지로 2020s, 2050s, 2080s 세 개의 기간으로 나누어서 25개의 시나리오를 나타내었으며 각 그래프의 가로축은 연도와 월이고 세로축은 유입량으로 단위는 CMS이다. 안동댐의 경우는 모든 시나리오에 대해 2020기간에서 267 CMS로 최고치를 기록하고, 2040s에서의 최고치는 345 CMS로 약 78 CMS 증가하였으며, 2080s에서는 약 396 CMS로 2020s보다 129 CMS 늘어난 것을 알 수 있다. 임하댐 유역의 경우는 모든 시나리오에 대해 2020s에서 최고 유입량이 약 184 CMS이고, 2040s에서는 약 232 CMS로 48 CMS가 증가하였으며 2080s에서는 약 264 CMS로 2020s의 최고치에 비해 80 CMS가 늘어난 것을 확인할 수 있다. 안동댐과 임하댐 모두 미래 강수량 분석 결과와 마찬가지로 미래로 갈수록 전반적으로 유입량이 증가하는 것을 알 수 있다.

각 시나리오 별 2011년 1월부터 2100년 12월까지의 월 유입량의 평균 값을 산정하여 비교하면 Table 4.6과 같다. 안동댐의 경우 가장 큰 값을 나타내는 것은 SCN23으로 36 CMS이며, 그 다음 큰 값은 SCN8에서 33 CMS이다. 가장 작은 값은 SCN22에서 25 CMS이다. 임하댐의 경우는 안동댐과 마찬가지로 SCN23에서 21 CMS로 가장 큰 값을 보이며 그 다음으로는 20 CMS로 SCN25에서 큰 값을 나타낸다. 가장 작은 값으로는 SCN22에서 13 CMS로 가장 작은 값을 보인다. 안동댐과 임하댐의 시나리오 별 양상을 살펴보면 Figure 4.21과 같이 나타낼 수 있다. 두 유역의 시나리오 별 추세가 비슷한 것을 볼 수 있으며 안동댐의 경우 최대치와 최소치의 편차가 11.67 CMS, 임하댐의 경우 8.56 CMS으로 두 댐 모두 시나리오 별 유입량의 격차가 상당히 나는 것을 확인할 수 있다.

Table 4.6 Monthly average inflow in Andongdam and Imhadam basins
for future period

Scenario	Monthly average inflow (CMS) (AD, 2011.1 ~ 2100.12)	Monthly average inflow (CMS) (IH, 2011.1 ~ 2100.12)
SCN1	30.24	14.78
SCN2	30.22	17.99
SCN3	26.58	14.85
SCN4	30.54	16.65
SCN5	30.21	16.48
SCN6	27.14	15.98
SCN7	25.75	13.63
SCN8	33.11	18.68
SCN9	29.57	13.40
SCN10	28.34	16.51
SCN11	28.61	14.56
SCN12	25.68	14.60
SCN13	28.43	15.03
SCN14	26.05	14.51
SCN15	25.75	14.02
SCN16	30.25	17.55
SCN17	29.15	13.41
SCN18	30.69	18.03
SCN19	28.86	16.09
SCN20	27.91	15.83
SCN21	26.23	14.86
SCN22	24.51	12.66
SCN23	36.19	21.23
SCN24	29.98	14.03
SCN25	32.80	20.40

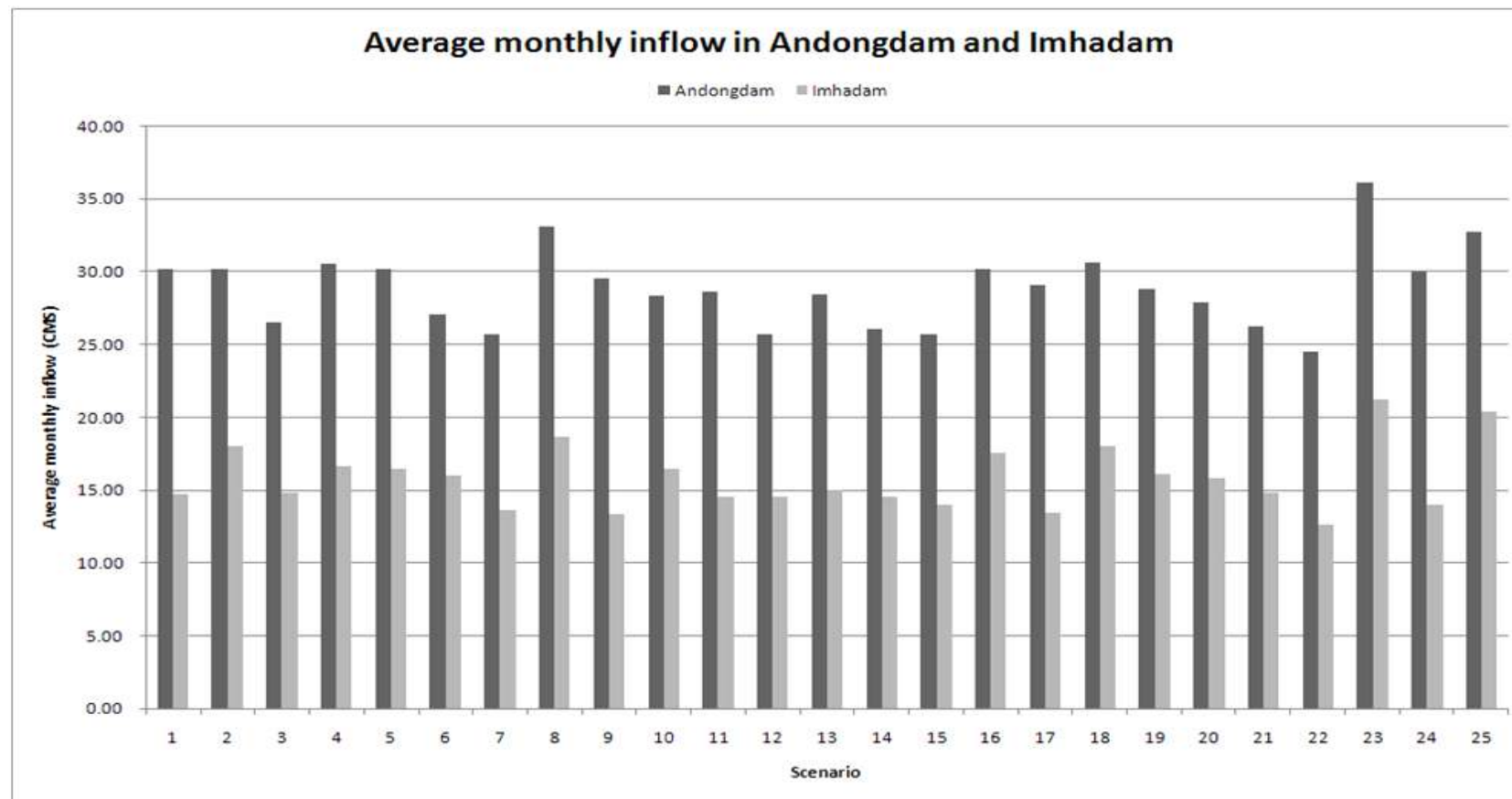


Figure 4.21 Average monthly inflow in Andongdam and Imhadam for future period
(SCN1 ~ SCN25, 2011.1 ~ 2100.12)

4.3 저수지 운영 능력 평가

4.3.1 성능인자(performance index) 설정

저수지 운영의 평가 인자는 절대적 평가(absolute metrics)와 상대적 평가(relative metrics)로 구분할 수 있다. 절대적 평가는 용수공급량이나 여수로 방류량과 같이 양의 크기를 평가하는 절대적인 방식을 뜻하고 상대적 평가는 설정된 시스템의 일정한 기준을 충족하는가의 여부를 평가하는 방식이다(Lettenmaier et al., 1999). 본 연구에서는 모의된 시나리오 별로 홍수기와 이수기의 저수지 운영 능력을 평가하기 인자를 Table 4.7과 같이 설정하였다. 이수기에 대하여 사용한 절대적 평가 인자는 해당 댐의 계획 용수공급량과 댐 제원에 의해 방류되는 용수공급량(amount of water supply)이고 상대적 인자는 운영 기간, 즉 모의 기간 중 계획용수공급에 성공한 횟수의 비율인 용수공급 신뢰도(reliability of water supply)를 뜻한다. 이러한 시스템 운영 결과를 한 개의 세트로 구성하면 신뢰도(ρ)는 식(4.1)과 같이 확률 형태로 나타낼 수 있다. 용수공급 신뢰도의 경우를 적용하면 X_t 는 댐 방류량을 의미하며 어느 t 기간에 댐 방류량이 계획용수공급량을 충족했을 경우 SS, 실패했을 경우 FS라고 여긴다.

$$\rho = \Pr(X_t \in SS) \quad (4.1)$$

홍수기에 대하여 사용한 절대적 평가 인자는 계획 용수공급량 외에 방류되는 여수로 방류량(amount of spill)이고 상대적 평가 인자는 모의 기간 중 여수로 방류가 되지 않는 횟수의 비율인 여수로비방류 신뢰도(reliability of non-spill)를 의미한다. 식(4.1)에서 댐 방류량(X_t)이 댐 여

수로 방류를 발생시키지 않는 것을 SS라고 하고 여수로 방류를 발생시키는 것을 FS라고 여긴다.

4.3.2 시나리오 별 댐 방류량 모의

시나리오 별 댐 방류량을 모의하기 위하여 Hec-ResSim 3.0을 사용하였다. 안동댐과 임하댐의 방류량 모의를 위한 댐의 수위 현황과 용수공급 계획량은 Table 4.8과 Table 4.9와 같다. HEC-ResSim 3.0은 모의 단위시간이 0.5시간, 1시간, 12시간, 24시간이 가능하도록 되어 있는데 본 연구에서는 가능한 단위시간 중 가장 긴 일 단위 모의를 실시하였다.

안동댐과 임하댐의 관측기간에 대한 방류량의 결과는 Figure 4.22과 Figure 4.23로 나타났다. 안동댐의 경우 1986년 1월부터 2010년 12월까지의 관측기간의 방류량 추세를 살펴보면 최고 방류량은 416 CMS를 기록했고 1996년 봄과 겨울에는 계획용수공급을 충족시키지 못하여 가뭄이 발생한 것을 확인할 수 있다. 임하댐의 경우 1992년 1월부터 2010년 12월까지의 관측기간의 최고 방류량은 656 CMS를 기록했고 1995년과 1996년, 2009년에 계획용수공급을 만족시키지 못한 것을 볼 수 있다. 특히 임하댐의 수치는 2009년 봄에 태백지역에서 일어났던 가뭄을 반영하고 있는 것을 알 수 있다.

미래기간 2011년부터 2100년까지의 25개의 시나리오에 대해 방류량을 모의한 결과를 안동댐의 경우 Figure 4.24 ~ 4.26로 나타냈고 임하댐의 경우는 Figure 4.27 ~ 4.29를 통해 살펴볼 수 있다. 강수량 모의와 마찬가지로 2020s, 2050s, 2080s 세 개의 기간으로 나누어 25개의 시나리오를 나타냈고 각 그래프의 가로축은 연도와 월, 일이고 세로축은 댐 방류량으로 단위는 CMS이며 25개의 시나리오의 방류량 양상의 차이를 좀 더 상세히 살펴보기 위해 로그 스케일을 적용하였다. 모든 시나리오에 대해 안동댐의 경우 2020s에서의 최고치는 440 CMS이고 2040s에서는 20 CMS 증가한 460 CMS로 나타났고 2080s에서는 638 CMS로 2020s의 최

Table 4.7 Performance index for scenarios

Effect Period	Classification	Performance index
Drought Period	Absolute	P1 (Amount of water supply)
	Relative	P2 (Reliability of water supply)
Flood Period	Absolute	P3 (Amount of spill)
	Relative	P4 (Reliability of non-spill)

Table 4.8 Water level data in Andongdam and Imhadam

Water level	Andongdam	Imhadam
Flood water level (FWL) (m)	161.7	164.7
Normal high water level (NHWL) (m)	160	163
Restricted water level (RWL) (m)	–	161.7
Low water level (LWL) (m)	130	137

Table 4.9 Planned water supply in Andongdam and Imhadam
(Working reference for dam operation, 2009)

Classification		Andongdam				Imhadam			
		Public and industrial water	Agricultural water	Maintenance water	Total	Public and Industrial Water	Agricultural water	Maintenance water	Total
Jan.	Inside of dam reservoir	-	-	-	-	1.8	-	-	0.1
	Dam downstream	14.3	-	5.6	19.9	9.7	-	6.8	18.2
	Total	14.3	-	5.6	19.9	11.5	-	6.8	18.3
Feb.	Inside of dam reservoir	-	-	-	-	1.8	-	-	0.1
	Dam downstream	14.3	-	5.6	19.9	9.7	-	6.8	18.2
	Total	14.3	-	5.6	19.9	11.5	-	6.8	18.3
Mar.	Inside of dam reservoir	-	-	-	-	1.8	-	-	0.1
	Dam downstream	14.3	-	5.6	19.9	9.7	-	6.8	18.2
	Total	14.3	-	5.6	19.9	11.5	-	6.8	18.3
Apr.	Inside of dam reservoir	-	-	-	-	1.8	-	-	0.1
	Dam downstream	14.3	0.9	5.6	20.8	9.7	0.1	6.8	18.3
	Total	14.3	0.9	5.6	20.8	11.5	0.1	6.8	18.4
May.	Inside of dam reservoir	-	-	-	-	1.8	-	-	0.1
	Dam downstream	14.3	13.8	5.6	33.7	9.7	0.5	6.8	18.7
	Total	14.3	13.8	5.6	33.7	11.5	0.5	6.8	18.8
Jun.	Inside of dam reservoir	-	-	-	-	1.8	-	-	0.1
	Dam downstream	14.3	29.4	5.6	49.3	9.7	1.2	6.8	19.4
	Total	14.3	29.4	5.6	49.3	11.5	1.2	6.8	19.5
Jul.	Inside of dam reservoir	-	-	-	-	1.8	-	-	0.1
	Dam downstream	14.3	20.6	5.6	40.5	9.7	0.9	6.8	19.1
	Total	14.3	20.6	5.6	40.5	11.5	0.9	6.8	19.2
Aug.	Inside of dam reservoir	-	-	-	-	1.8	-	-	0.1
	Dam downstream	14.3	30.3	5.6	50.2	9.7	1.3	6.8	19.5
	Total	14.3	30.3	5.6	50.2	11.5	1.3	6.8	19.6
Sep.	Inside of dam reservoir	-	-	-	-	1.8	-	-	0.1
	Dam downstream	14.3	16.5	5.6	36.4	9.7	0.7	6.8	18.9
	Total	14.3	16.5	5.6	36.4	11.5	0.7	6.8	19.0
Oct.	Inside of dam reservoir	-	-	-	-	1.8	-	-	0.1
	Dam downstream	14.3	2.1	5.6	22.0	9.7	0.1	6.8	18.3
	Total	14.3	2.1	5.6	22.0	11.5	0.1	6.8	18.4
Nov.	Inside of dam reservoir	-	-	-	-	1.8	-	-	0.1
	Dam downstream	14.3	-	5.6	19.9	9.7	-	6.8	18.2
	Total	14.3	-	5.6	19.9	11.5	-	6.8	18.3
Dec.	Inside of dam reservoir	-	-	-	-	1.8	-	-	0.1
	Dam downstream	14.3	-	5.6	19.9	9.7	-	6.8	18.2
	Total	14.3	-	5.6	19.9	11.5	-	6.8	18.3
Total	Inside of dam reservoir (CMS)	-	-	-	-	1.8	-	-	1.8
	(million m ³)	-	-	-	-	56.8	-	-	56.8
	Dam downstream (CMS)	14.3	9.5	5.6	29.4	9.7	0.4	6.8	16.9
	(million m ³)	449.8	300.0	176.0	926.0	306.8	13.0	215.0	534.8
Total (CMS)		14.3	9.5	5.6	29.4	11.5	0.4	6.8	18.7
	(million m ³)	450.0	300.0	176.0	926.0	363.6	13.0	215.0	591.6

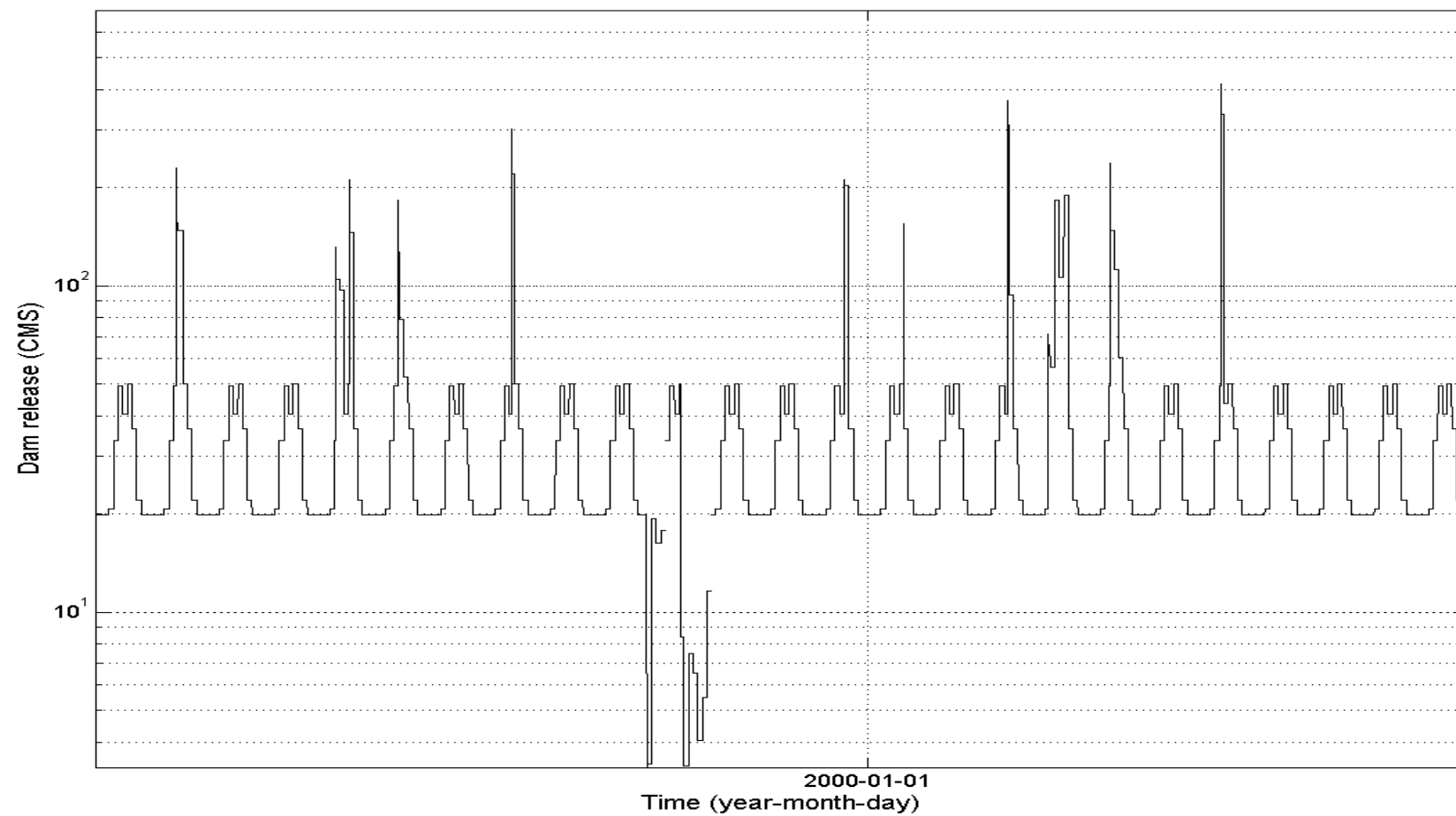


Figure 4.22 Daily dam release in Andongdam (Observed scenario, 1986.1.1 ~ 2010.12.31)

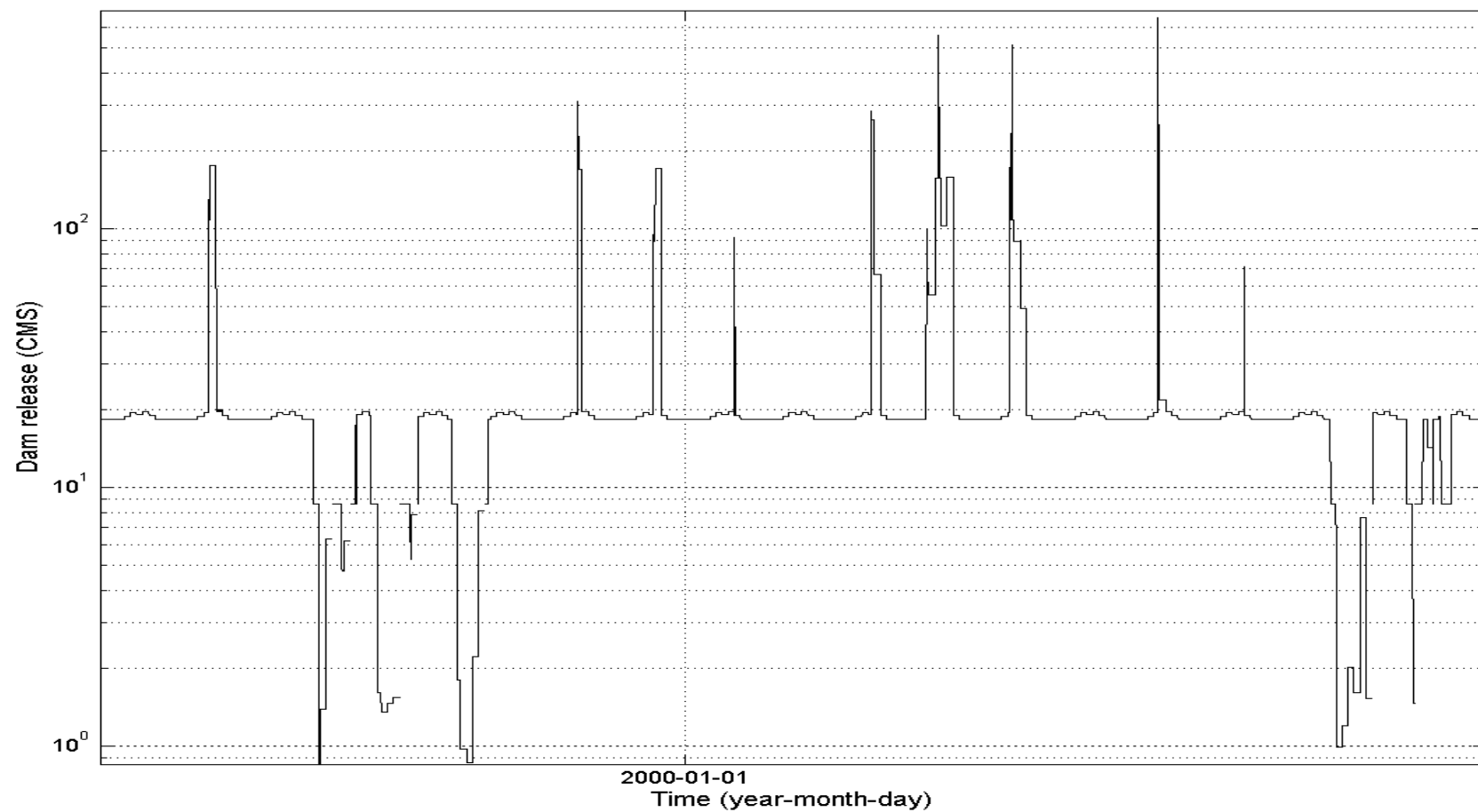


Figure 4.23 Daily dam release in Imhadam (Observed scenario, 1992.1.1 ~ 2010.12.31)

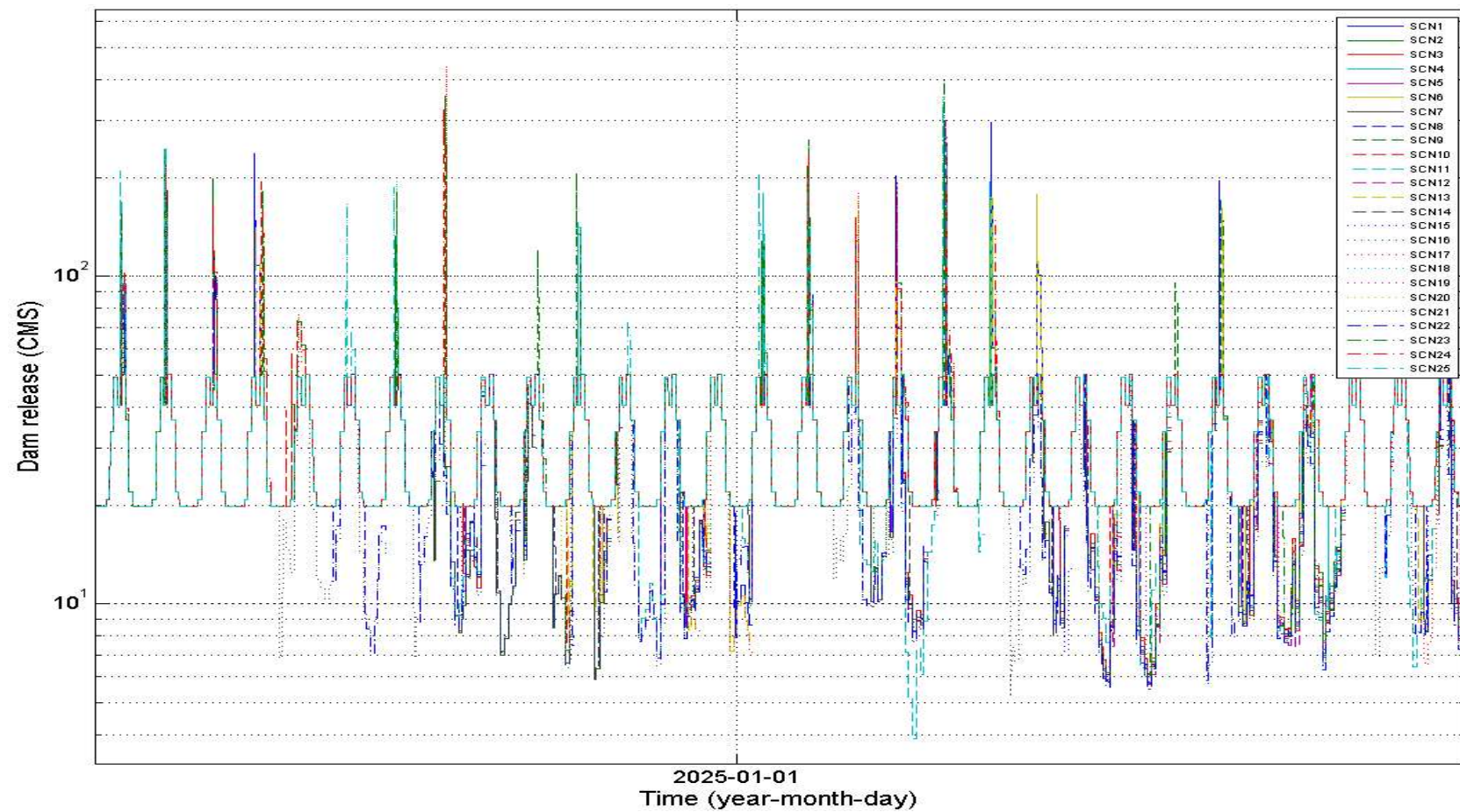


Figure 4.24 Daily dam release in Andongdam (SCN1 ~ SCN25, 2011.1.1 ~ 2040.12.31)

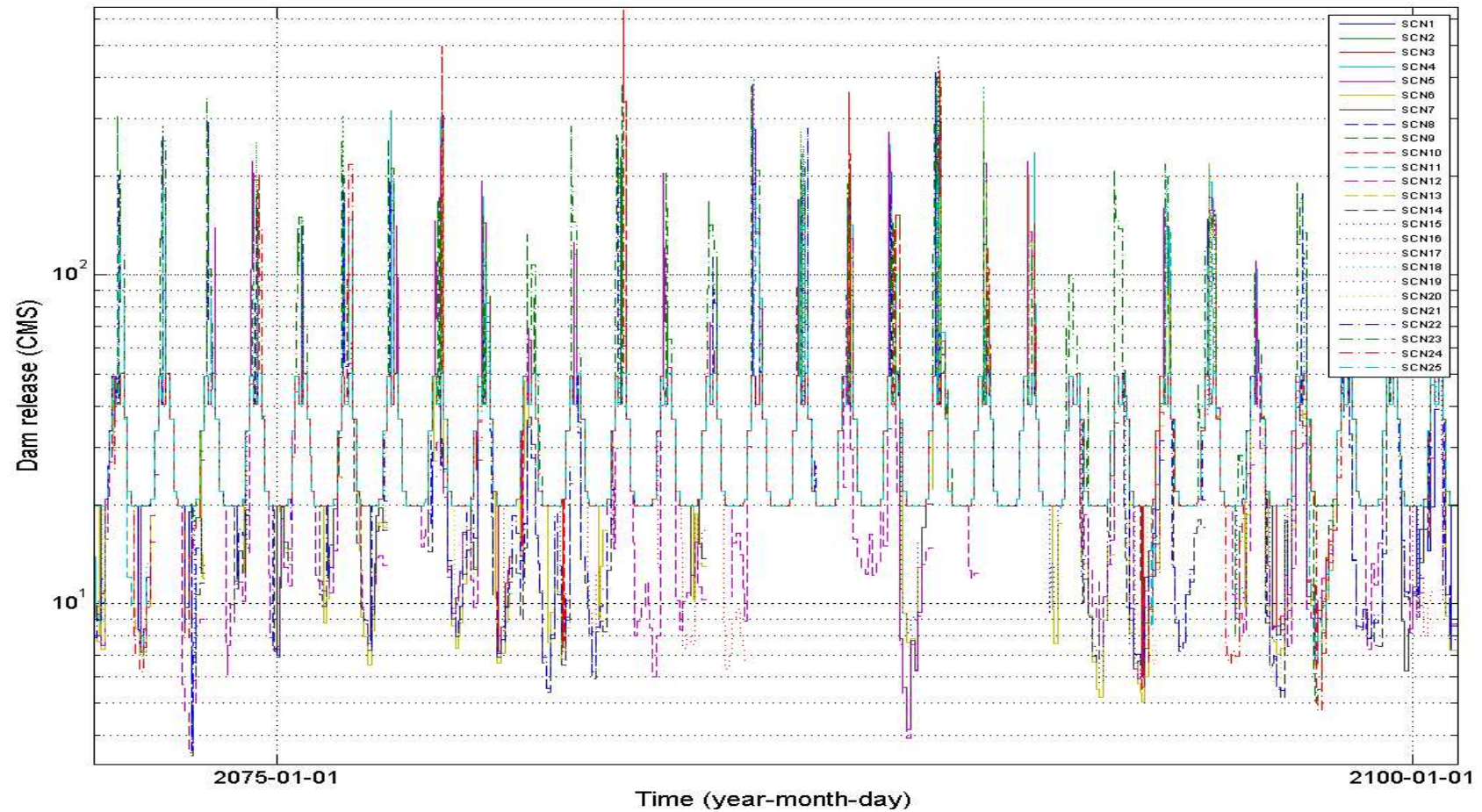


Figure 4.25 Daily dam release in Andongdam (SCN1 ~ SCN25, 2041.1.1 ~ 2070.12.31)

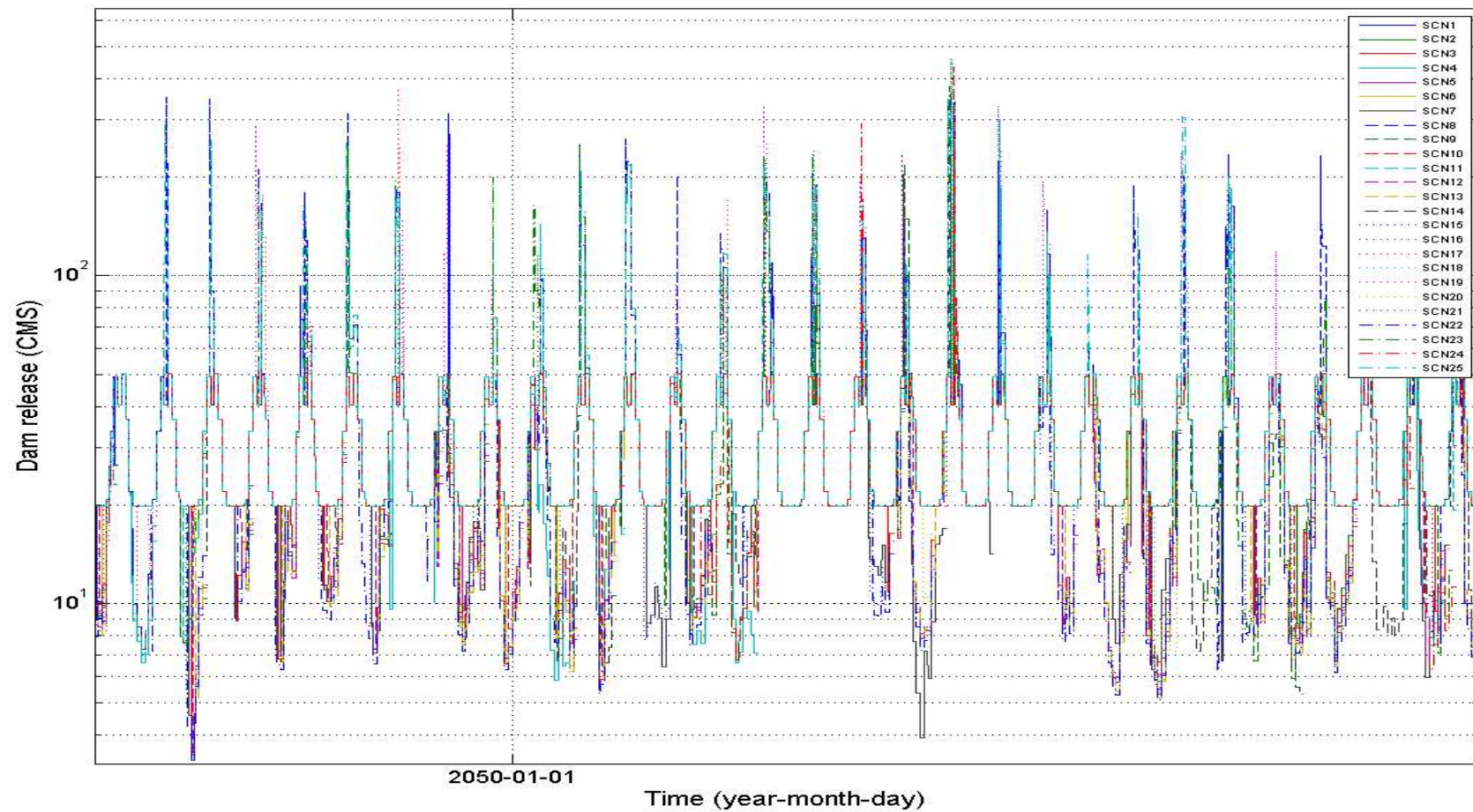


Figure 4.26 Daily dam release in Andongdam (SCN1 ~ SCN25, 2071.1.1 ~ 2100.12.31)

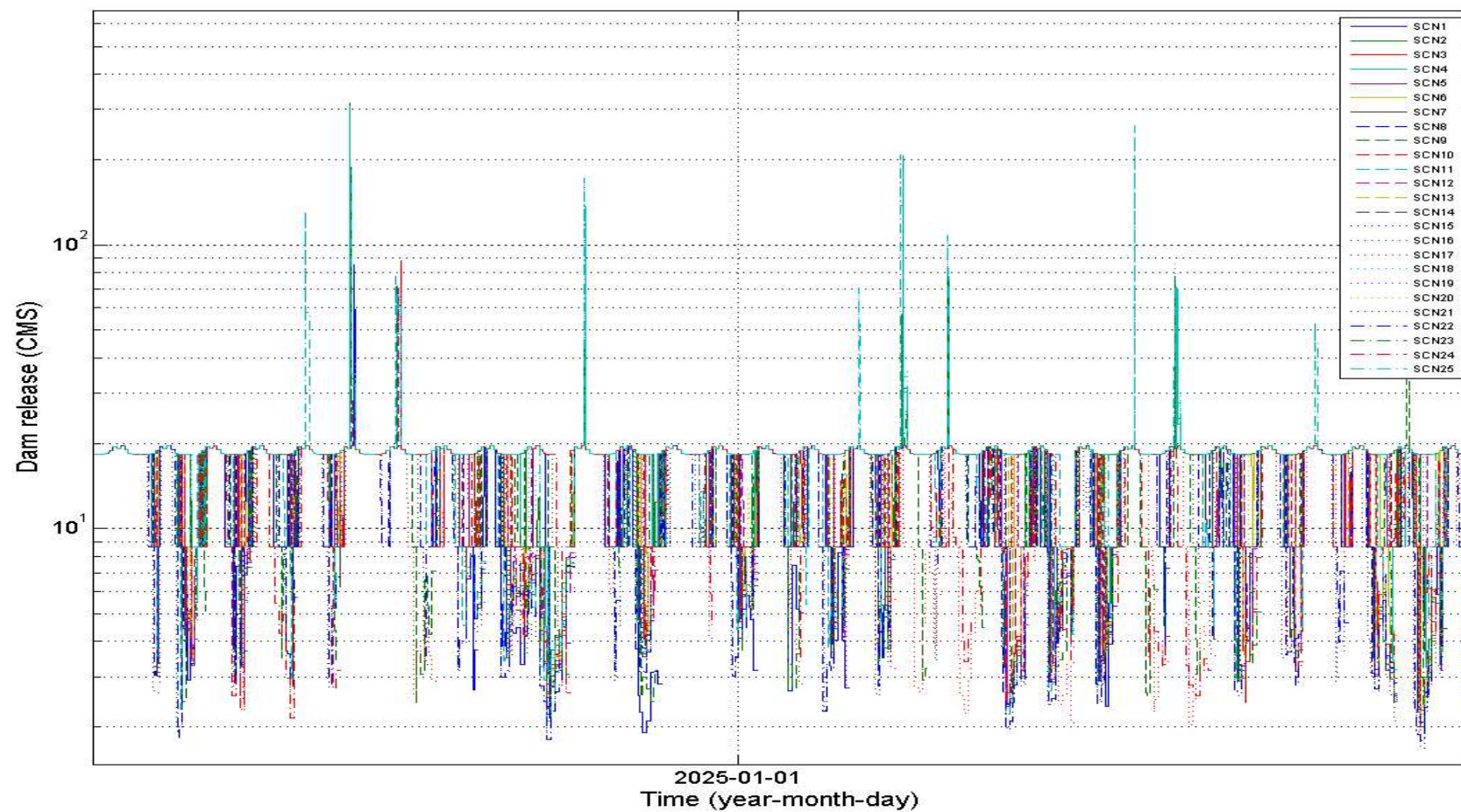


Figure 4.27 Daily dam release in Imhadam (SCN1 ~ SCN25, 2011.1.1 ~ 2040.12.31)

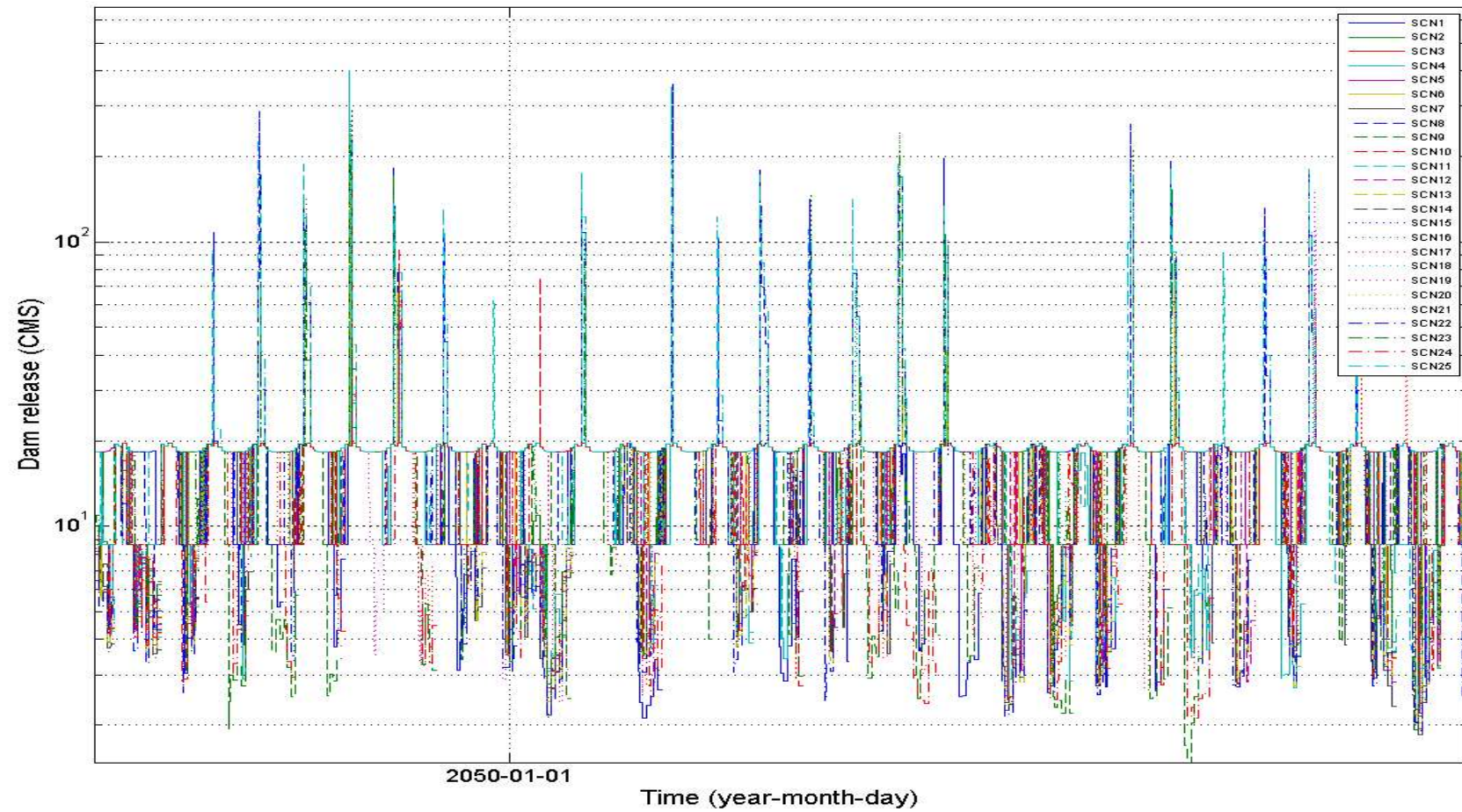


Figure 4.28 Daily dam release in Imhadam (SCN1 ~ SCN25, 2041.1.1 ~ 2070.12.31)

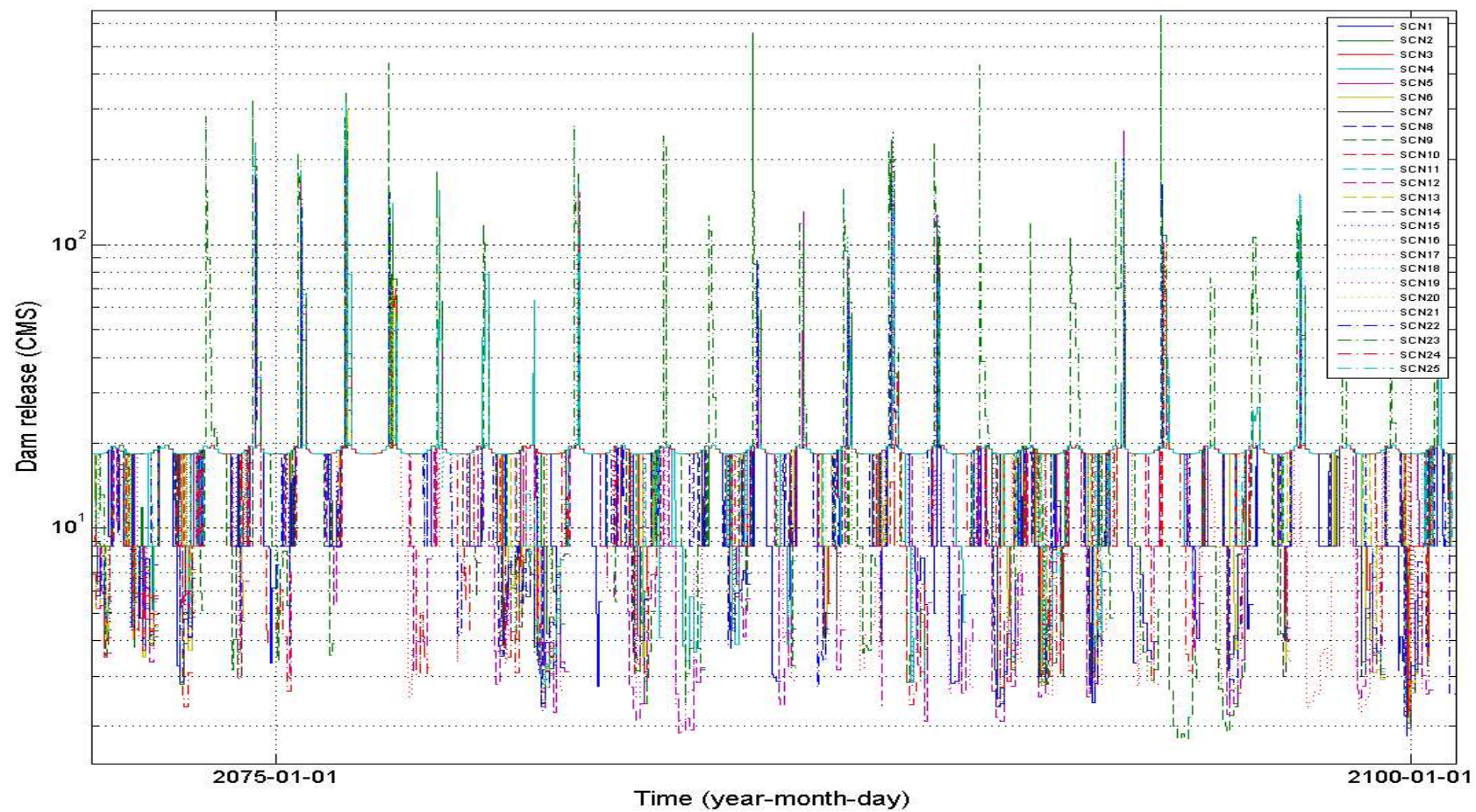


Figure 4.29 Daily dam release in Imhadam (SCN1 ~ SCN25, 2071.1.1 ~ 2100.12.31)

고치보다 198 CMS 증가한 것을 알 수 있다. 마찬가지로 모든 시나리오에 대해 임하댐의 경우는 2020s에서 최고 방류량이 316 CMS이고 2040s에서 84 CMS 증가한 400 CMS로 나타났고 2080s에서는 648 CMS로 2020s의 최고치보다 332 CMS 늘었다. 안동댐과 임하댐 모두 앞서 모의했던 강우량과 유입량의 분석 결과와 마찬가지로 미래로 갈수록 방류량의 최고치가 증가하는 경향을 가진다는 것을 알 수 있다.

4.3.3 시나리오 별 성능인자 산정

모의된 과거와 미래 시나리오에 대해서 Table 4.7의 P1 ~ P4 성능인자를 산정하였다. 이수기와 홍수기의 절대적 평가 인자인 용수공급량과 여수로 방류량은 미래 시나리오에 대해 2011년부터 2100년의 연 평균 누적량을 산정하였고 관측값을 이용하여 모의한 관측 시나리오의 경우도 각 댐의 관측기간에 대해 연 평균 누적량을 산정하였다. 상대적 평가 인자인 용수공급 신뢰도와 여수로비방류 신뢰도는 모의 기간에 대해서 신뢰도의 평균을 산정하였다.

성능인자 별로 Table 4.10 ~ Table 4.13에 결과를 나타내었다. 첫 번째 평가인자인 용수공급량 P1을 나타낸 Table 4.10은 안동댐과 임하댐, 그리고 안동댐과 임하댐의 합을 제시하였다. 관측기간에 대한 안동댐의 용수공급량이 연 평균 약 7억 9천만 톤이고 임하댐의 경우는 5억 3천만 톤이며 두 댐의 연평균 용수공급량은 총 13억 2천만 톤 정도로 산출되었다. 미래 시나리오들에 대해서 살펴보면 가장 큰 값을 보이는 시나리오는 안동댐과 임하댐 모두 SCN25이고 각각 9억 2천만 톤, 5억 7천만 톤이 산정되었고 두 댐을 합쳐 약 14억 9천만 톤이다. 가장 작은 값을 가져오는 시나리오는 두 댐 모두 SCN22이고 각각 7억 8천만 톤, 4억 1천만 톤이다. 25개의 모든 시나리오의 평균을 산출하면 안동댐의 경우 8억 8천만 톤 임하댐의 경우 4억 9천만 톤이 산정되었고 두 유역 총 합은 약 13억 7천 톤이다. 관측기간의 값과 미래 시나리오의 평균값을 비교하면

안동댐의 경우 미래 시나리오가 9천만 톤 정도 증가되고 임하댐의 경우는 약 4천만 톤 정도가 감소되는 것을 확인할 수 있으며 두 유역의 총합을 비교하면 약 5천만 톤이 증가되는 것을 알 수 있다. 평균적으로 볼 때 과거에 비해 두 댐의 미래 용수공급량이 약 5천만 톤 늘어날 것으로 추정할 수 있다.

두 번째 평가인자인 용수공급 신뢰도 P2를 Table 4.11을 통해 살펴보면 관측기간에 대한 안동댐의 값은 약 96 %이고 임하댐의 경우는 약 84 %로 산정되었고 두 댐의 평균 신뢰도는 90 %이다. 미래 시나리오들을 살펴보면 최고치를 가져오는 시나리오는 안동댐과 임하댐 모두 첫 번째 인자와 마찬가지로 SCN25이며 각각 98 %와 93 %가 산정되었고 두 댐의 평균 값은 약 96 %이다. 가장 작은 값을 가져오는 시나리오는 두 댐 모두 SCN22이고 안동댐은 61 %, 임하댐은 51 %로 매우 낮은 신뢰도를 보이고 있는 것을 알 수 있다. 25개의 모든 시나리오의 평균을 살펴보면 안동댐은 86 %, 임하댐은 72 %이고 두 댐 평균은 79 %이다. 관측기간의 신뢰도와 미래 시나리오의 평균값을 비교하면 안동댐은 9 %정도 감소하고 임하댐은 12 %가 감소하며 두 댐 평균 약 11 %가 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과에 의하여 두 댐의 용수공급량 신뢰도가 과거에 비해 약 10% 이상 줄어들 것으로 기대할 수 있다.

세 번째 평가인자인 여수로 방류량 P3은 Table 4.12에 의하면 관측기간에 대한 안동댐의 값은 1억 6천만 톤이고 임하댐의 경우는 1억 9천만 톤이고, 두 댐의 평균은 3억 5천만 톤이다. 미래 시나리오들의 결과를 살펴보면 가장 큰 값을 산정되는 시나리오는 안동댐과 임하댐 모두 SCN23이며 각각 2억 3천만 톤, 1억 1천만 톤이고 두 댐의 합은 약 3억 4천만 톤이다. 가장 작은 값이 산정된 시나리오는 안동댐의 경우 SCN7이고 임하댐은 SCN22이고, 각각 3백만 톤, 8만 톤이다. 25개 시나리오의 평균을 살펴보면 안동댐은 4천 9백만 톤이고 임하댐은 1천 7백만 톤이고 두 댐의 합은 약 6천 5백만 톤이다. 관측기간의 여수로 방류량과 미래시나리오의 평균을 비교하면, 안동댐의 경우 미래시나리오가 1억 1천만 톤

감소하고 임하댐의 경우 1억 7천만 톤 감소하며 두 댐을 합쳐 약 2억 9천만 톤이 감소하는 결과를 보인다. 미래에는 과거보다 두 댐을 합쳐 여수로 방류량이 약 3억만 톤 정도 줄어든 것이라고 추정할 수 있다.

네 번째 평가 인자인 여수로비방류 신뢰도 P4를 Table 4.13을 통해 살펴보면 관측기간에 대한 안동댐 값은 약 80 %이고 임하댐은 93 %로 나타나고 두 댐의 평균 값은 87 %이다. 미래 시나리오의 결과에서는 가장 큰 값을 보이는 시나리오는 안동댐에서는 SCN7이고 임하댐에서는 SCN22이고, 두 댐 모두 99 %로 높은 신뢰도를 보인다. 가장 작은 값이 산출된 시나리오는 두 댐 모두 SCN23으로 안동댐은 90 %, 임하댐은 94 %를 가진다. 미래 시나리오의 평균값을 살펴보면 안동댐은 97 %이고 임하댐은 98 %이며 두 댐 평균은 98 %를 나타낸다. 관측기간의 신뢰도와 미래 시나리오의 평균치를 비교하면 안동댐은 미래시나리오가 약 17 % 더 크고 임하댐은 약 5 %가 더 크며 두 댐 평균 약 11 % 정도가 증가하는 경향을 보인다. 과거보다 미래에 두 댐의 평균 여수로비방류 신뢰도가 11 % 증가할 것이라고 추정된다.

Table 4.10 Annual average accumulated amount of water supply
(Observed: 1986 ~ 2010 (AD), 1992 ~ 2010 (IH); Future: 2011 ~ 2100)

Scenario index	Andongdam	Imhadam	Andongdam+Imhadam
Observed period	791,655,000	529,175,000	1,320,830,000
SCN1	917,563,000	473,958,000	1,391,521,000
SCN2	918,225,000	552,792,000	1,471,016,000
SCN3	845,689,000	476,315,000	1,322,004,000
SCN4	904,929,000	512,224,000	1,417,153,000
SCN5	886,197,000	507,242,000	1,393,439,000
SCN6	866,230,000	509,314,000	1,375,543,000
SCN7	822,885,000	438,495,000	1,261,380,000
SCN8	898,119,000	535,906,000	1,434,025,000
SCN9	902,240,000	429,154,000	1,331,394,000
SCN10	894,739,000	523,502,000	1,418,241,000
SCN11	885,155,000	467,331,000	1,352,487,000
SCN12	818,714,000	466,060,000	1,284,774,000
SCN13	874,637,000	480,105,000	1,354,742,000
SCN14	830,857,000	466,311,000	1,297,168,000
SCN15	823,559,000	450,573,000	1,274,132,000
SCN16	884,223,000	526,805,000	1,411,027,000
SCN17	908,093,000	430,303,000	1,338,397,000
SCN18	915,808,000	552,023,000	1,467,831,000
SCN19	917,241,000	510,528,000	1,427,769,000
SCN20	888,141,000	505,549,000	1,393,690,000
SCN21	831,221,000	467,921,000	1,299,142,000
SCN22	783,425,000	407,103,000	1,190,528,000
SCN23	919,765,000	561,750,000	1,481,515,000
SCN24	909,155,000	450,411,000	1,359,566,000
SCN25	922,545,000	570,541,000	1,493,086,000
Average SCN	878,774,000	490,889,000	1,369,663,000

Table 4.11 Average reliability of water supply
(Observed: 1986 ~ 2010 (AD), 1992 ~ 2010 (IH); Future: 2011 ~ 2100)

Scenario index	Andongdam	Imhadam	Andongdam+Imhadam
Observed period	0.9589	0.8408	0.8999
SCN1	0.9676	0.6715	0.8196
SCN2	0.9695	0.8797	0.9246
SCN3	0.7799	0.6840	0.7319
SCN4	0.9341	0.7779	0.8560
SCN5	0.8845	0.7713	0.8279
SCN6	0.8293	0.7717	0.8005
SCN7	0.7084	0.5946	0.6515
SCN8	0.9214	0.8444	0.8829
SCN9	0.9233	0.5744	0.7489
SCN10	0.9058	0.8045	0.8551
SCN11	0.8780	0.6514	0.7647
SCN12	0.7066	0.6734	0.6900
SCN13	0.8556	0.7021	0.7788
SCN14	0.7309	0.6607	0.6958
SCN15	0.7174	0.6216	0.6695
SCN16	0.8841	0.8221	0.8531
SCN17	0.9447	0.5697	0.7572
SCN18	0.9649	0.8810	0.9229
SCN19	0.9671	0.7696	0.8684
SCN20	0.8860	0.7551	0.8206
SCN21	0.7414	0.6731	0.7072
SCN22	0.6153	0.5119	0.5636
SCN23	0.9755	0.9110	0.9433
SCN24	0.9470	0.6133	0.7801
SCN25	0.9830	0.9331	0.9580
Average SCN	0.8649	0.7249	0.7949

Table 4.12 Annual average accumulated amount of spill
(Observed: 1986 ~ 2010 (AD), 1992 ~ 2010 (IH); Future: 2011 ~ 2100)

Scenario index	Andongdam	Imhadam	Andongdam+Imhadam
Observed period	161,873,000	189,168,000	351,041,000
SCN1	51,461,000	691,000	52,152,000
SCN2	44,297,000	23,538,000	67,835,000
SCN3	6,164,000	624,000	6,787,000
SCN4	66,848,000	18,258,000	85,107,000
SCN5	73,282,000	20,635,000	93,917,000
SCN6	4,798,000	3,591,000	8,389,000
SCN7	2,623,000	89,000	2,713,000
SCN8	153,709,000	61,969,000	215,678,000
SCN9	44,168,000	1,501,000	45,669,000
SCN10	12,126,000	6,028,000	18,153,000
SCN11	27,351,000	334,000	27,686,000
SCN12	5,951,000	1,581,000	7,532,000
SCN13	34,388,000	2,568,000	36,956,000
SCN14	5,719,000	92,000	5,812,000
SCN15	3,591,000	91,000	3,682,000
SCN16	77,233,000	35,132,000	112,365,000
SCN17	25,813,000	968,000	26,782,000
SCN18	61,998,000	25,352,000	87,350,000
SCN19	95,953,000	3,692,000	99,645,000
SCN20	5,041,000	2,493,000	7,534,000
SCN21	9,371,000	9,242,000	18,613,000
SCN22	3,811,000	81,000	3,892,000
SCN23	229,082,000	113,140,000	342,222,000
SCN24	48,962,000	145,000	49,106,000
SCN25	124,558,000	82,716,000	207,274,000
Average SCN	48,732,000	16,582,000	65,314,000

Table 4.13 Average reliability of non-spill
(Observed: 1986 ~ 2010 (AD), 1992 ~ 2010 (IH); Future: 2011 ~ 2100)

Scenario index	Andongdam	Imhadam	Andongdam+Imhadam
Observed data	0.8042	0.9300	0.8671
SCN1	0.9609	0.9924	0.9767
SCN2	0.9750	0.9739	0.9745
SCN3	0.9917	0.9922	0.9920
SCN4	0.9641	0.9776	0.9708
SCN5	0.9621	0.9764	0.9692
SCN6	0.9907	0.9879	0.9893
SCN7	0.9928	0.9933	0.9930
SCN8	0.9347	0.9538	0.9443
SCN9	0.9678	0.9913	0.9795
SCN10	0.9890	0.9867	0.9878
SCN11	0.9788	0.9926	0.9857
SCN12	0.9915	0.9910	0.9913
SCN13	0.9751	0.9901	0.9826
SCN14	0.9903	0.9929	0.9916
SCN15	0.9923	0.9932	0.9928
SCN16	0.9619	0.9682	0.9651
SCN17	0.9777	0.9926	0.9852
SCN18	0.9667	0.9732	0.9699
SCN19	0.9546	0.9894	0.9720
SCN20	0.9907	0.9892	0.9899
SCN21	0.9910	0.9857	0.9883
SCN22	0.9922	0.9939	0.9930
SCN23	0.9030	0.9372	0.9201
SCN24	0.9703	0.9931	0.9817
SCN25	0.9401	0.9478	0.9440
Average SCN	0.9722	0.9822	0.9772

제 5 장 최적 및 로버스트 의사결정의 적용

본 장에서는 제 4장에서 안동댐과 임하댐에 대하여 산정한 성능인자의 결과를 기반으로 용수공급능력을 증진시킬 수 있는 대안을 구축한 후 성능인자 별로 대안의 우선순위를 도출하였다. 대안을 평가하는 과정에서 최적 의사결정(ODM)과 로버스트 의사결정(RDM)을 적용하였으며 각 대안의 순위를 비교하여 두 방법의 결과 차이를 분석하였다.

5.1 대안 설정 및 평가

5.1.1 대안 설정

안동댐과 임하댐이 위치한 낙동강이 반복적인 가뭄에 대처하기 위한 대안으로 신규 댐 건설, 빗물 집수 시설 설치, 담수화 시설, 댐 운영 개선 등이 있다. 이러한 대안은 비용이 드는 ‘건설적 대안(structural alternatives)’과 비용이 들지 않는 ‘비건설적 대안(non-structural alternatives)’으로 분류할 수 있다.

본 연구는 ODM과 RDM에 의한 의사결정의 결과를 비교하는 데 그 목적이 있기 때문에 대안 결과를 간략화 하기 위하여 비건설적 대안 중 댐 수위 조정으로만 그 범위를 한정시켰다. 이를 위해 Figure 3.7과 같은 댐의 설계 수위에서 이수용량(water conservation storage)을 증대시켜 반복적으로 발생하는 가뭄을 개선할 수 있도록 상시만수위를 현재보다 상승시키거나 최저수위를 하강시키는 대안을 ALT1 ~ ALT6으로 설정하였다. Table 5.1을 상세히 보면 ALT1(AD_NHWL), ALT2(IH_NHWL)과 ALT3(AD+IH_NHWL)은 안동댐과 임하댐의 상시만수위를 현재보다 상승시키는 내용의 대안이고 ALT4(AD_LWL), ALT5(IH_LWL)와

Table 5.1 Alternatives for a reservoir operation

Alternative index	Alternative name	Initial alternative (a)	Final alternative (b)
ALT1	AD_NHWL	AD NHWL + 1 m	AD NHWL + 0.2 m
ALT2	IH_NHWL	AD NHWL + 1 m	AD NHWL + 1 m
ALT3	AD+IH_NH WL	AD NHWL + 0.5 m, IH NHWL + 0.5 m	AD NHWL + 0.1 m, IH NHWL + 0.5 m
ALT4	AD_LWL	AD LWL - 1 m	AD LWL - 1 m
ALT5	IH_LWL	IH LWL - 1 m	IH LWL - 1 m
ALT6	AD+IH_LW L	AD LWL - 0.5 m, IH LWL - 0.5 m	AD LWL - 0.5 m, IH LWL - 0.5 m

ALT6(AD+IH_LWL)는 최저수위를 하강시키는 대안이다. ALT1과 ALT2는 안동댐과 임하댐 각각 현재의 상시만수위보다 1 m씩 상승시키고 ALT3은 안동댐 0.5 m, 임하댐 0.5 m을 증가시켰다. ALT4와 ALT5는 현재 지정된 최저수위보다 두 댐을 각각 1 m 하강시키고 ALT6은 안동댐 0.5 m, 임하댐 0.5 m을 감소시켰다. 그러나 다음과 같이 설정한 ALT1 ~ ALT6 대안을 ODM과 RDM을 적용하여 평가 한 결과 특정 대안 즉, ALT1과 ALT3의 성능인자가 모든 시나리오에 비해 월등히 커 RDM과 ODM의 순위차이가 매우 미비하게 나타나는 결과를 보였다. 따라서 ALT1의 내용 중 안동댐 상시만수위 증가 수치를 1 m 에서 0.2 m 로 수정하고 ALT3에서는 안동댐의 상시만수위를 0.5 m 증가에서 0.1 m 로 변경하여 다양한 시나리오에 대하여 대안들이 서로 경쟁적(competitive)인 성능인자를 도출해 낼 수 있도록 조정하였다. 따라서 최종적으로 사용한 대안은 Table 5.1(b)와 같다.

5.1.2 시나리오-대안 별 성능인자 산정

대안을 평가하기 위해 4.3.1절에서 설정한 P1 ~ P4 평가인자를 기반으로 네 개의 인자를 Table 5.2와 같이 구성하였다. PA1 ~ PA4는 4.3.3절에서 평가한 어떤 대안도 적용하지 않았을 시 즉 현재상태의 용수공급량, 용수공급 신뢰도, 여수로 방류량, 여수로비방류 신뢰도에 대하여 대안을 적용했을 시 변하는 증감량이다. PA1의 경우는 대안을 적용했을 시 변동하는 용수공급량을 경제적으로 환산한 순현재가(net present value)를 의미한다. PA2는 대안 적용 시 용수공급 신뢰도의 변동량을 뜻하고 P3은 대안 적용 시 여수로 방류량의 변동량, PA4는 대안 시행 시 여수로비방류 신뢰도의 증감량을 말한다. 본 장에서는 관측기간과 미래 시나리오에 대하여 네 개의 평가 인자를 산정하였다. PA1 ~ PA4의 성능인자를 식으로 나타내면 식 (5.1)과 같다. $Performance'(A_i, S_j)$ 는 PA1 ~ PA4를 뜻하는 것으로 j 번째 시나리오에서 i 번째 대안을 적용했을 시

Table 5.2 Performance index for alternatives

Effect period	Classification	Performance index (performance index name)	Note
Drought Period	Absolute	PA1 (Amount of water supply)	Net present value for increased amount of water supply over no alternatives
	Relative	PA2 (Reliability of water supply)	Increased reliability of water supply over no alternatives
Flood Period	Absolute	PA3 (Amount of spill)	Decreased amount of spill over no alternatives
	Relative	PA4 (Reliability of non-spill)	Increased reliability of non-spill over no alternatives

아무런 대안을 적용하지 않은 현재 상태를 유지했을 때보다 어느 정도 효과가 있는지를 성능인자 별로 측정한 값이다.

$$Performance'(A_i, S_j) = Performance(A_i, S_j) - Performance(A_i, S_{present}) \quad (5.1)$$

첫 번째 성능인자인 용수공급량 순현재가(net present value for amount of water Supply)인 PA1은 각 시나리오 별로 아무 대안도 적용하지 않은 현재 상태보다 어떤 대안을 적용했을 시 안동댐과 임하댐에서 발생하는 연 평균 누적 용수공급량의 총 합의 변동량을 경제적으로 환산하여 순 현재 가치로 변환한 값을 의미한다. 순현재가(NPV)를 산정하기 위해서는 식 (5.2)의 t 차 년도에 발생하는 (B_t) , t 차년도에 발생하는 비용(C_t), 할인율(r), 분석기간(n)을 정해야 한다.

$$NPV = \frac{B_0 - C_0}{(1+r)^0} + \frac{B_1 - C_1}{(1+r)^1} + \dots + \frac{B_n - C_n}{(1+r)^n} = \sum_{t=0}^n \frac{NB_t}{(1+r)^t} \quad (5.2)$$

할인율은 1999년도에 한국개발연구원(KDI)에서 수행한 “예비타당성 조사 수행을 위한 지침”의 공공투자 사업의 할인율로 기재되어 있는 7.5%를 사용하였다. 공공투자사업의 타당성을 평가하기 위한 사업효과의 지속기간인 분석기간 즉, 내용연수는 수자원 분야의 사업목적별 내용연수는 “댐건설 및 주변지역 지원 등에 관한 법률 시행령” 제 27조 규정에 명시되어 있는 것을 기반으로 50년으로 가정하였다. 비용은 한국 수자원공사로부터 조사된 월별 댐용수 공급실적 데이터를 기반으로 댐 용수의 가격을 1 m³ 당 10원으로 가정하였고 비용은 댐의 수위 조정에 관한 대안이므로 0원으로 간주하였다.

PA1 산정결과는 Table 5.3과 같다. 시나리오 별로 다양한 양상을 보이는 것을 Figure 5.1을 통해 확인할 수 있는데, PA1이 양수일 때 대안을 적용하지 않았을 경우보다 수익을 산출하는 것이므로 대안의 효과가 있

는 것이라고 볼 수 있다. ALT2의 경우는 시나리오 별로 최대와 최소 차이가 1천 8백만 원으로 차이가 가장 작게 나타났고 ALT5의 차이가 1억 4천만 원으로 가장 큰 것으로 확인되었다. 시나리오에 대한 표준편차도 마찬가지로 ALT2에서 가장 작고 ALT5에서 가장 큰 값을 갖는다.

두 번째 성능인자인 용수공급 신뢰도(reliability of water supply)인 PA2는 대안을 적용하지 않았을 시 산정된 각 시나리오 별 신뢰도에서 대안을 실시했을 때 변하는 증감 정도를 뜻한다. PA2가 양수일 때 신뢰도가 대안으로 인해 증가하는 것이므로 용수공급측면에서 대안의 효과가 있는 것이라고 할 수 있다. Table 5.4의 모의 결과를 살펴보면 시나리오 모두 대안의 적용에 따라 신뢰도의 증감정도가 대부분 0.01 이하로 영향을 많이 받지 않는 것으로 나타났다. 시나리오 별 평가 결과 ALT1, ALT3, ALT4에서 대부분 신뢰도가 감소하고 ALT2, ALT5, ALT6에서 증가하는 경향을 보이는 것으로 나타났다. 시나리오 간의 양상을 Figure 5.2를 통해 살펴보면 최대와 최소값의 차이가 가장 큰 대안은 ALT4이고 가장 작은 대안은 ALT2이다. 표준편차의 경우 ALT5가 가장 커서 시나리오별 변동성이 가장 큰 것을 알 수 있고 표준편차가 가장 작은 ALT2는 시나리오 별로 성능인자 값의 차이가 별로 없는 것을 확인할 수 있다.

세 번째 성능인자인 여수로 방류량(amount of spill)인 PA3도 마찬가지로 아무 대안을 적용하지 않았을 때 산정된 각 시나리오의 연 평균 누적 여수로 방류량에서 대안 적용 시 변동되는 방류량을 의미한다. 여수로 방류량은 감소할수록 소모되는 물의 양이 줄어들기 때문에 저류공간의 물 양이 늘어나고 지체되는 시간도 증가될 가능성이 크다. 따라서 PA3의 경우는 값이 음수일 때 대안을 적용하지 않았을 때와 비교하여 효과가 있는 것으로 여긴다. Table 5.5의 모의 결과를 보면 ALT2를 제외한 나머지 대안의 대부분의 시나리오에서 값이 감소한 것을 알 수 있다. Figure 5.3에 나타난 시나리오들의 최대와 최소가 가장 큰 차이를 보이는 대안은 약 64만 톤으로 ALT5이고 가장 작은 것은 약 13만 톤인

Table 5.3 Amount of water supply'in alternatives (SCN1 ~ SCN25)
(unit: 1,000 won)

	ALT1	ALT2	ALT3	ALT4	ALT5	ALT6
SCN1	79,127	42,774	72,802	89,633	19,383	66,462
SCN2	29,819	42,773	37,367	35,045	79,495	58,953
SCN3	38,059	42,774	43,241	43,314	18,703	33,239
SCN4	45,865	42,773	53,413	51,091	60,773	65,240
SCN5	29,812	42,773	37,322	35,074	39,447	39,712
SCN6	34,186	42,773	48,654	36,833	47,781	53,138
SCN7	14,925	42,774	29,392	17,558	7,435	11,991
SCN8	15,793	42,773	30,261	18,406	40,294	31,525
SCN9	44,721	42,773	45,350	52,560	29,259	40,638
SCN10	46,720	42,773	47,349	54,559	56,775	57,263
SCN11	28,010	42,774	35,559	33,236	19,460	26,516
SCN12	22,783	42,774	37,251	25,396	18,888	26,307
SCN13	41,460	42,773	49,008	46,723	22,597	43,617
SCN14	40,391	42,774	47,939	45,616	6,311	31,597
SCN15	28,845	42,774	43,315	31,487	-15,341	28,045
SCN16	17,295	42,773	31,762	19,908	67,771	45,732
SCN17	87,151	42,773	80,860	97,603	7,721	68,620
SCN18	32,956	40,518	39,883	38,192	96,079	67,720
SCN19	14,923	42,773	29,390	17,536	34,574	26,394
SCN20	29,965	42,773	37,513	35,263	49,794	43,586
SCN21	37,792	42,773	45,340	43,018	48,850	52,929
SCN22	36,919	42,774	44,467	42,240	-42	25,789
SCN23	14,909	42,773	29,377	17,522	67,481	43,519
SCN24	44,728	42,774	45,358	52,567	7,858	32,121
SCN25	30,734	24,714	34,924	35,960	121,017	101,208
Max SCN	87,151	42,774	80,860	97,603	121,017	101,208
Min SCN	14,909	24,714	29,377	17,522	-15,341	11,991
STDEV SCN	17,591	3,621	12,353	19,726	32,134	19,451

Table 5.4 Reliability of water supply in alternatives
(SCN1 ~ SCN25) (unit: 1×10^{-3})

	ALT1	ALT2	ALT3	ALT4	ALT5	ALT6
SCN1	1.095	0.639	0.700	1.399	7.697	4.350
SCN2	0.335	1.034	0.669	0.426	3.772	2.129
SCN3	-2.099	0.913	-2.038	-1.917	7.636	1.430
SCN4	-1.156	0.700	-1.065	-1.065	5.506	1.430
SCN5	0.487	0.852	0.456	0.730	6.023	3.225
SCN6	-2.860	0.821	-2.464	-2.829	6.784	0.395
SCN7	-2.008	0.669	-1.795	-1.977	9.431	2.738
SCN8	0.061	0.852	0.243	0.122	4.350	2.129
SCN9	0.821	0.639	0.548	1.034	10.617	5.567
SCN10	-0.274	0.821	-0.274	-0.091	5.871	2.221
SCN11	-0.365	0.700	-0.304	-0.274	8.974	3.803
SCN12	-3.164	0.882	-2.890	-3.042	8.913	1.095
SCN13	-1.156	0.882	-1.065	-1.034	7.271	2.342
SCN14	-3.346	0.913	-3.255	-3.194	8.396	0.548
SCN15	-2.525	0.852	-2.282	-2.464	8.761	1.825
SCN16	-0.426	0.791	-0.183	-0.395	5.476	2.160
SCN17	0.608	0.882	0.274	0.821	9.218	4.685
SCN18	0.973	0.973	1.065	1.186	4.076	2.768
SCN19	0.243	0.913	0.578	0.304	5.780	2.920
SCN20	-1.795	0.852	-1.795	-1.643	6.175	0.761
SCN21	-1.673	0.700	-1.643	-1.551	7.240	1.673
SCN22	-7.240	0.730	-7.179	-7.119	9.765	-2.403
SCN23	0.274	0.882	0.487	0.304	3.133	1.795
SCN24	0.791	0.700	0.578	1.004	9.461	4.959
SCN25	0.730	0.548	0.761	0.973	3.651	2.707
Max SCN	1.095	1.034	1.065	1.399	10.617	5.567
Min SCN	-7.240	0.548	-7.179	-7.119	3.133	-2.403
STDEV SCN	1.916	0.119	1.855	1.946	2.164	1.669

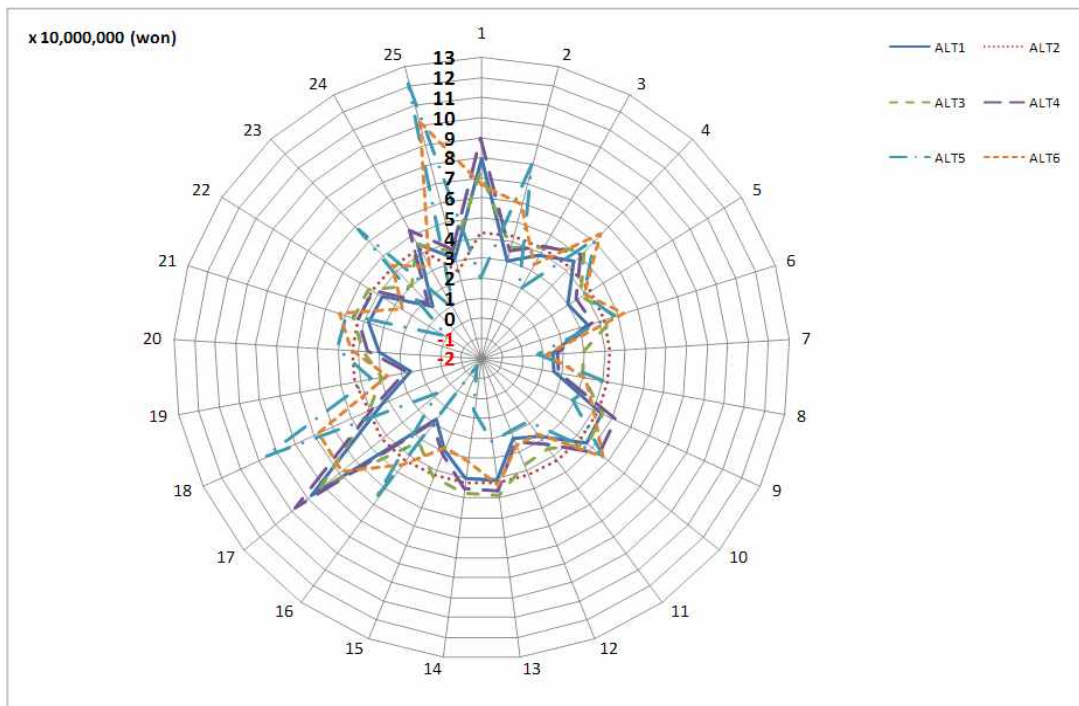


Figure 5.1 Amount of water supply in alternatives (SCN1 ~ SCN25)

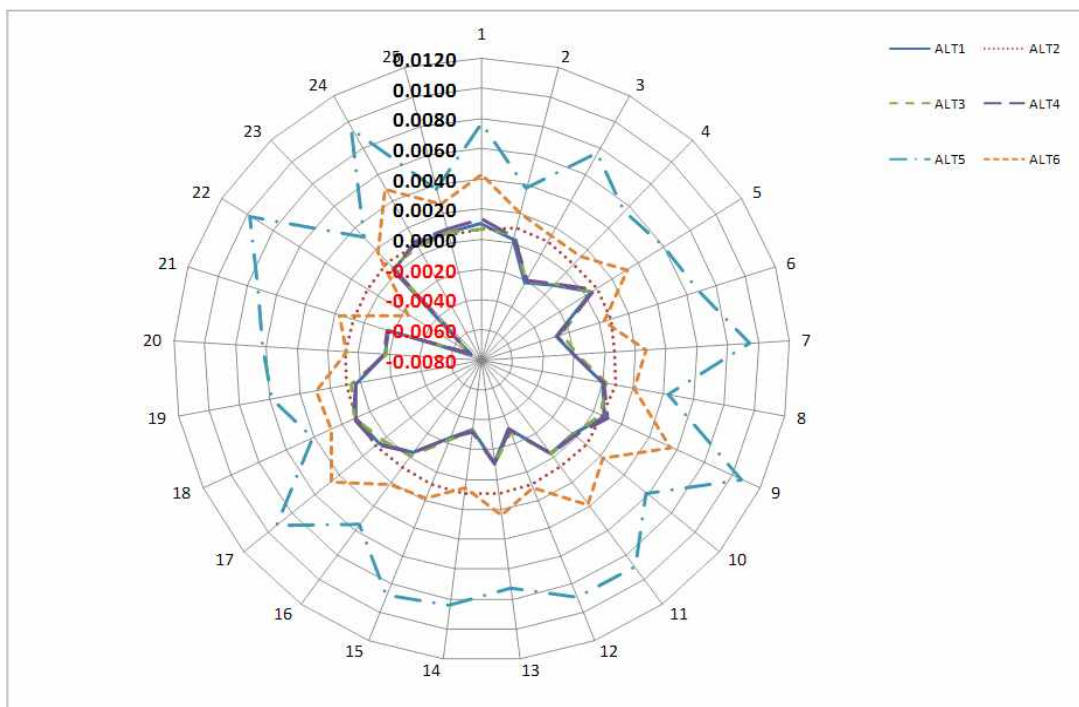


Figure 5.2 Reliability of water supply in alternatives (SCN1 ~ SCN25)

ALT2이다. 표준편차는 ALT5에서 가장 크고 ALT2에서 가장 작은 값을 가진다.

네 번째 성능인자인 여수로비방류 신뢰도(reliability of non-spill)인 PA4도 나머지 세 개의 인자와 같이 대안을 적용하지 않았을 때 산정된 각 시나리오의 신뢰도에 대하여 대안 적용 시 변동되는 값을 뜻한다. 여수로비방류 신뢰도가 증가할수록 용수공급측면에서 유리하게 여겨지므로 PA4가 양수일 때 대안의 효과가 있는 것이다. Table 5.6의 모의 결과를 보면 대안 별 변동되는 정도가 대부분 0.01이하로 대안의 영향을 크게 받지는 않는 것을 알 수 있다. 시나리오 별로 변동량이 다양한 것을 Figure 5.4를 통해 볼 수 있는데 최대 최소의 차이가 가장 큰 것은 ALT5이고 가장 작은 것은 ALT2이다. 표준편차의 결과도 ALT5에서 가장 크고 ALT2에서 가장 작은 값을 가진다.

5.2 의사결정 기법의 적용

본 절에서는 최적 의사결정과 로버스트 의사결정을 사용하여 5.1.2절에서 산정한 25개의 시나리오에 대하여 산정된 평가인자들을 이용하여 각 대안의 순위를 산정하였다. 먼저 대조군 시나리오(reference scenario)로서 관측 시나리오의 대안을 평가하여 순위를 산정하고 최적 의사결정과 로버스트 의사결정 두 기법을 적용한 미래의 시나리오에 대해 대안들의 순위를 매겨 평가인자 별로 결과를 비교 분석하였다.

5.2.1 관측 시나리오

안동댐과 임하댐의 관측치를 입력 자료로 모의된 댐 방류량 시나리오를 ODM과 RDM의 의사결정 기법의 결과를 비교하기 위한 대조군으로서 Table 5.2의 PA1 ~ PA4 네 개의 평가인자에 대하여 ALT1 ~ ALT6의 대안을 평가한 후 Table 5.7과 같이 순위를 도출하였다.

Table 5.5 Amount of spill in alternatives (SCN1 ~ SCN25)
(unit: m³/year)

	ALT1	ALT2	ALT3	ALT4	ALT5	ALT6
SCN1	-378,168	0	-223,821	-436,760	-71,652	-289,703
SCN2	-221,349	0	-118,624	-260,142	-520,224	-407,577
SCN3	-171,844	0	-120,482	-191,451	-75,456	-168,026
SCN4	-340,457	0	-237,732	-379,250	-451,123	-484,282
SCN5	-221,301	0	-118,292	-260,360	-220,589	-258,669
SCN6	-8,240	0	-8,240	-8,490	-282,451	-154,468
SCN7	-113	0	-113	-267	1,248	327
SCN8	-117,234	0	-65,872	-136,631	-269,059	-203,964
SCN9	-221,292	0	-118,567	-260,085	-138,182	-193,479
SCN10	-236,133	0	-133,407	-274,925	-349,219	-319,938
SCN11	-207,923	0	-105,197	-246,715	-72,228	-160,715
SCN12	-10,655	0	-10,655	-10,655	-140,214	-78,476
SCN13	-307,764	0	-205,039	-346,831	-114,240	-302,843
SCN14	-111,305	0	-59,942	-130,701	576	-69,068
SCN15	8	0	-8	-210	672	393
SCN16	-128,382	0	-77,020	-147,779	-433,181	-309,423
SCN17	-525,599	0	-371,511	-583,788	-9,888	-411,081
SCN18	-244,639	16,742	-137,297	-283,504	-640,973	-466,580
SCN19	-110,771	0	-59,409	-130,168	-184,416	-159,812
SCN20	-111,757	0	-60,394	-131,687	-297,398	-218,412
SCN21	-169,857	0	-118,494	-189,253	-290,390	-287,768
SCN22	-110,254	0	-58,892	-130,354	313	-69,297
SCN23	-110,675	0	-59,312	-130,071	-500,918	-323,049
SCN24	-221,349	0	-118,624	-260,142	-16,475	-148,492
SCN25	-110,675	134,054	-34,381	-130,071	-595,037	-372,182
Max SCN	8	134,054	-8	-210	1,248	393
Min SCN	-525,599	0	-371,511	-583,788	-640,973	-484,282
STDEV SCN	124,776	26,880	85,068	140,593	203,022	136,881

Table 5.6 Reliability of non-spill in alternatives (SCN1 ~ SCN25)
(unit: 1×10^{-5})

	ALT1	ALT2	ALT3	ALT4	ALT5	ALT6
SCN1	30.4	0.0	15.2	33.5	3.0	24.3
SCN2	9.1	0.0	3.0	9.1	24.3	15.2
SCN3	0.0	0.0	-3.0	3.0	3.0	3.0
SCN4	36.5	0.0	24.3	36.5	39.5	48.7
SCN5	9.1	0.0	0.0	15.2	0.0	3.0
SCN6	0.0	0.0	0.0	3.0	48.7	27.4
SCN7	3.0	0.0	3.0	6.1	-9.1	0.0
SCN8	3.0	0.0	0.0	3.0	15.2	6.1
SCN9	27.4	0.0	21.3	27.4	9.1	27.4
SCN10	3.0	0.0	3.0	3.0	36.5	18.3
SCN11	9.1	0.0	0.0	12.2	9.1	9.1
SCN12	6.1	0.0	6.1	6.1	30.4	21.3
SCN13	9.1	0.0	3.0	15.2	27.4	33.5
SCN14	15.2	0.0	15.2	18.3	-3.0	12.2
SCN15	-3.0	0.0	0.0	3.0	-6.1	-3.0
SCN16	12.2	0.0	6.1	12.2	33.5	27.4
SCN17	21.3	0.0	18.3	24.3	-3.0	18.3
SCN18	0.0	0.0	0.0	0.0	36.5	15.2
SCN19	6.1	0.0	3.0	6.1	12.2	9.1
SCN20	0.0	0.0	0.0	6.1	12.2	15.2
SCN21	9.1	0.0	6.1	9.1	6.1	9.1
SCN22	-3.0	0.0	-6.1	6.1	-6.1	3.0
SCN23	0.0	6.1	6.1	0.0	152.1	36.5
SCN24	6.1	0.0	3.0	9.1	-3.0	3.0
SCN25	3.0	-6.1	-3.0	3.0	33.5	18.3
Max SCN	8.5	0.0	5.0	10.8	20.1	16.1
Min SCN	10.4	1.8	7.8	10.1	32.3	12.7
STDEV SCN	36.5	6.1	24.3	36.5	152.1	48.7

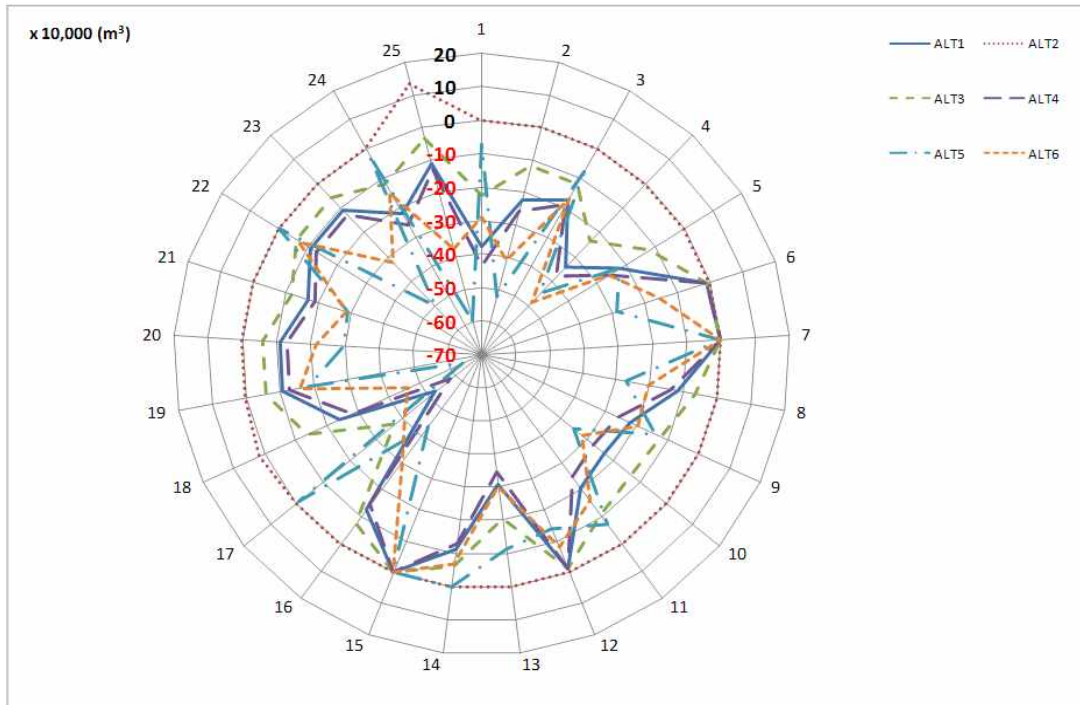


Figure 5.3 Amount of spill in alternatives (SCN1 ~ SCN25)

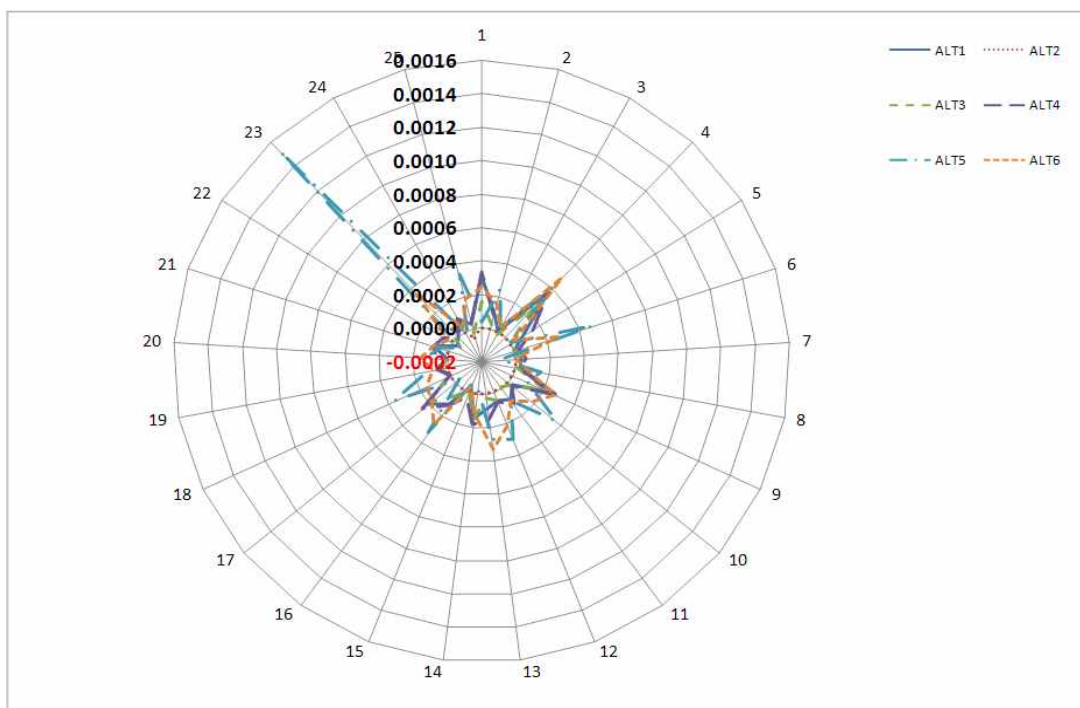


Figure 5.4 Reliability of non-spill in alternatives (SCN1 ~ SCN25)

Table 5.7 Estimation alternatives in performance indices in observed scenario

Performance index	Estimation	ALT1	ALT2	ALT3	ALT4	ALT5	ALT6
PA1 (Amount of water supply)	Observed period	177,810	0	229,010	187,217	35,053	157,606
	Rank	3	6	1	2	5	4
PA2 (Reliability of water supply)	Observed period (1×10^{-3})	-2.847	0.000	1.469	-2.738	2.161	-3.176
	Rank	5	3	2	4	1	6
PA3 (Amount of spill)	Observed period	-1,319,903	1,503,997	-1,357,818	-1,389,729	-89,128	-417,927
	Rank	3	6	2	1	5	4
PA4 (Reliability of non-spill)	Observed period (1×10^{-3})	0.329	1.441	0.329	0.438	0.000	1.049
	Rank	4	1	4	3	6	2

첫 번째 평가인자인 용수공급량 순인 PA1의 결과를 살펴보면 ALT2에서는 수익이 전혀 없는 것으로 산정되었고 여섯 개의 대안 중 ALT3이 약 2억 3천억 원으로 가장 큰 수익을 얻는 1순위 대안으로 산정되었다. 두 번째 평가인자인 용수공급 신뢰도인 PA2의 결과는 ALT1, ALT4, ALT6을 실시했을 때 신뢰도가 감소하는 경향을 보였고 ALT2는 P1의 결과와 같이 아무런 영향을 주지 못하는 것으로 나타났고 ALT3과 ALT5는 신뢰도를 증가시키는 것으로 확인되었다. 순위 상으로 살펴보면 ALT5가 1순위, ALT6이 가장 낮은 6순위이다. 세 번째 평가인자인 여수로 방류량 PA3의 경우 ALT2를 제외한 나머지 대안에서는 방류량이 감소한 것을 알 수 있다. 순위의 결과는 ALT4가 1순위, ALT2가 6순위가 되었다. 마지막으로 네 번째 평가인자인 여수로비방류 신뢰도 PA4는 ALT5의 값이 0으로 대안으로 인한 영향을 전혀 받지 않는 것으로 나타났고 나머지 대안에서 신뢰도가 증가하고 있음을 알 수 있다. 대안의 순위를 검토해 보면 ALT2가 1순위 ALT5가 6순위로 산정되었다.

5.2.2 최적 의사결정(Optimal Decision Making, ODM)

최적 의사결정을 적용하기 위하여 식 (5.3)에 기댓값을 계산한다. i 번째 대안의 기댓값($EV(A_i)$)은 i 번째 대안(A_i)과 j 번째 시나리오(S_j)에 해당하는 성능인자에 각 시나리오에 부여된 확률($P(S_j)$)을 곱한 값의 합이다.

$$EV(A_i) = \sum_{j=1}^n performance(A_i, S_j) \times P(S_j) \quad (5.3)$$

본 연구에서는 25개의 시나리오에 동일한 확률을 일괄적으로 부여하여 ODM의 기댓값을 산정하였고 그 결과는 Table 5.8과 같다.

이수기의 절대적 평가인자인 PA1은 안동댐과 임하댐의 최저수위를 동일한 크기로 하강시킨 대안인 ALT6이 순현재가 4천 5백만 원으로 1순위를 되었고 그 뒤로는 두 댐의 상시만수위를 적정하게 낮춘 ALT3이 4천

3백만 원의 순현가로 2순위 따른다. 가장 낮은 대안은 안동댐의 상시만 수위를 상승시킨 ALT1로 3천 6백만 원의 값을 내려 6순위를 보였다.

이수기의 상대적 평가인자인 PA2는 임하댐의 최저수위를 낮춘 ALT5가 신뢰도 0.007이 증가되면서 1순위가 되었고 그 뒤로 ALT6이 2순위이다. 가장 낮은 순위는 PA1의 결과와 마찬가지로 ALT1이 6순위이다. 홍수기의 절대적 평가인자인 PA3의 결과를 살펴보면 ALT6이 23만 톤으로 가장 많이 줄어들어 1순위가 되었고 그 뒤로는 ALT5가 가장 크게 줄어들었다. 임하댐의 상시만수위를 증가시키는 ALT2는 오히려 방류량이 늘어나 가장 하위 순위가 되었다.

홍수기의 상대적 평가인자인 PA4는 대안 별 차이가 매우 미비하지만 ALT5가 극소의 차이로 1순위를 차지하고 ALT6이 2순위를 보였다. ALT2의 경우는 대안의 효과가 전혀 없는 것을 나타나 6순위가 되었다. Table 5.8에 네 개의 평가인자에 대한 ODM에 의한 결과를 종합적으로 나타내었다. 절대적 평가 인자인 P1과 P3에서 공통적으로 ALT6이 1순위가 나왔고, 상대적 평가 인자인 P2와 P4에서 똑같이 ALT5가 1순위가 도출되었다. 최하위 순위인 대안을 살펴보면 이수기 평가인자인 P1과 P2에서 공통적으로 ALT1이 6순위가 나왔고 홍수기 평가인자인 P3와 P4에서 공통적으로 ALT2가 최하위를 보였다. 네 평가인자에 대해 각 대안의 평균 순위를 산정하였는데 ALT6이 1.5순위로 가장 높은 값을 나타냈으며 그 뒤로 ALT5, ALT4, ALT3, ALT2, ALT1이 차례대로 높은 순위로 보였다.

5.2.3 로버스트 의사결정(Robust Decision Making)

로버스트 의사결정을 시행하기 위해서는 각 대안 별 25개의 시나리오에 대해서 후회도를 산정해야 한다. 후회도는 각 시나리오의 최대값을 가져오는 대안에서 각 대안의 성능인자를 빼 각 대안의 최대기회손실을 측정하고 그 중 최소값을 제공하는 대안을 선택하는 기준이다. 기후변화와

Table 5.8 Estimation expected value and ranks in performance indices with ODM

Performance index	Estimation value	ALT1	ALT2	ALT3	ALT4	ALT5	ALT6
PA1 (Amount of water supply)	Expected value (unit: 1,000 won)	35,516	41,961	43,084	40,654	38,095	44,874
	Rank	6	3	2	4	5	1
PA2 (Reliability of water supply)	Expected value	-0.000947	0.000806	-0.000875	-0.000812	0.006959	0.002290
	Rank	6	3	5	4	1	2
PA3 (Amount of spill)	Expected value (unit: m ³ /year)	-175,909	6,032	-104,853	-202,412	-226,820	-234,263
	Rank	4	6	5	3	2	1
PA4 (Reliability of non-spill)	Expected value	0.000085	0.000000	0.000050	0.000108	0.000201	0.000161
	Rank	4	6	5	3	1	2
Average rank in PA1 ~ PA4		5	4.5	4.25	3.5	2.25	1.5

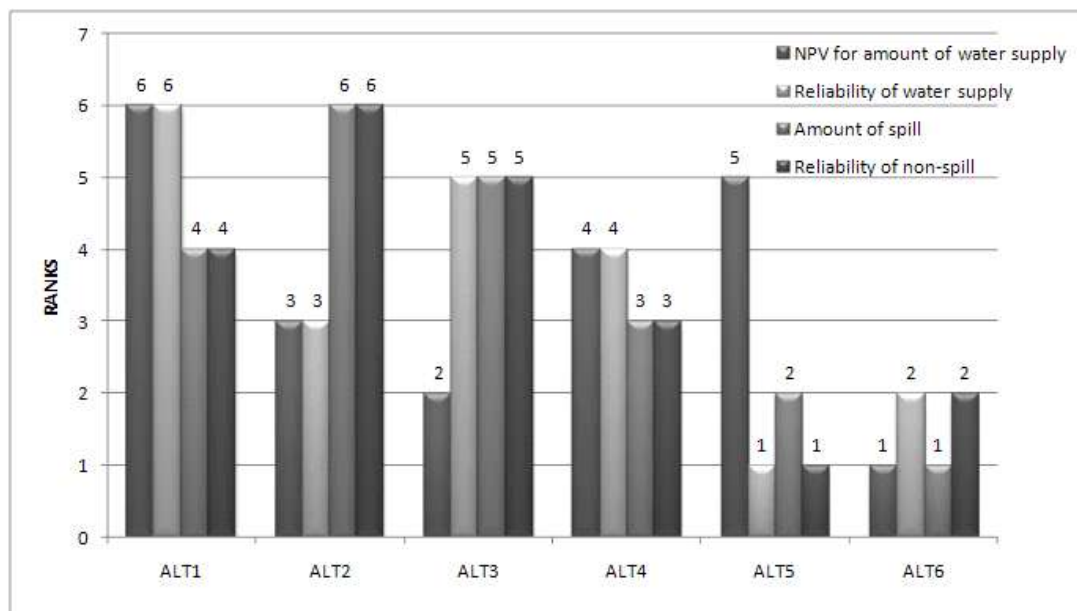


Figure 5.5 Ranks of alternatives in performance indices with ODM

같이 시나리오의 가능성에 대한 정보의 불확실성이 매우 클 경우 계획의 최대기회손실을 줄이거나 없앴으로써 위험을 회피하려는 보수적인 성격을 가진 인자라고 할 수 있다. 식 (5.4)에서 A_i 는 i 번째 대안, S_j 는 j 번째 시나리오, A' 는 모든 대안을 의미한다. 각 시나리오를 고정시키고 모든 대안에서 가장 성능인자가 큰 값에서 각 대안의 성능인자 값을 빼 후회도를 산정하는 방식으로 시나리오와 대안으로 이루어진 매트릭스(matrix)에 후회도를 모두 입력한다. 그 후 식(5.5)에 의해 대안을 고정시키고 모든 시나리오에서 가장 큰 후회도를 추출하여 최대 후회도를 산정하게 된다. 그리고 대안 별로 순위를 부여할 시 최대 후회도가 가장 낮은 대안이 1순위를 차지하고 같은 맥락으로 최대 후회도가 낮을수록 순위가 높아진다.

$$Regret(A_i, S_j) = \max_{A'} [performance(A', S_j)] - performance(A_i, S_j) \quad (5.4)$$

$$Min[Max_s, Regret(A_i, S')] \quad (5.5)$$

용수공급량 순현가인 PA1의 후회도는 Table 5.9과 같고 분포는 Figure 5.6과 같다. 안동댐과 임하댐의 최저수위를 같이 하강시켰던 대안 ALT6이 1순위를 나타냈으며 임하댐의 상시만수위를 상승시킨 ALT2가 가장 하위인 6순위의 결과를 냈다. Figure 5.6을 살펴보면 SCN17과 SCN25일 때 일부 대안에서 매우 높은 후회도가 나타나는 것을 알 수 있다.

용수공급의 신뢰도 PA2의 후회도의 결과는 Table 5.10와 Figure 5.7에 나타냈다. 임하댐의 최저수위를 하강시킨 대안 ALT5가 가장 커 1순위의 결과를 보이고 안동댐의 상시만수위를 상승시킨 ALT1의 순위 결과가 가장 낮은 것으로 나타났다. Figure 5.7을 보면 대부분의 대안이 시나리오 별로 매우 유사한 패턴을 보이는 것을 알 수 있고 ALT1의 후회도가 모든 대안에 대해서 대부분 큰 것을 알 수 있다. SCN22에서 대체적으로 모든 대안의 값이 상대적으로 높은 것으로 나타났다.

여수로 방류량인 PA3의 후회도를 Table 5.11과 Figure 5.8와 같다. 최대 후회도가 가장 작은 대안은 ALT6으로 1순위가 되었고 ALT2가 가장 큰 최대 최소 후회도를 가져 6순위가 되었다. Figure 5.8을 통해 시나리오 별 대안의 결과를 살펴보면 ALT6이 대부분 시나리오에서 대체적으로 다른 대안에 비해 높은 후회도를 가지고 그 변화 폭도 큰 것으로 확인된다. SCN17, SCN18, SCN25에서 다른 시나리오들에 비해 대부분 대안에서 상대적으로 높은 후회도를 보이는 것을 알 수 있다.

여수로비방류 신뢰도인 PA4의 후회도의 결과는 Table 5.12과 Figure 5.9와 같다. 최대 최소 후회도 값이 가장 작은 ALT5가 1순위가 되었고 ALT1과 ALT4가 공동 5순위로 가장 최대 최소 후회도가 큰 대안이 되었다. Figure 5.9를 보면 대안의 효과가 대체적으로 모든 시나리오에서 미비한 것을 볼 수 있다. 그러나 SCN23에서 ALT5를 제외한 나머지 다섯 개 대안에서 후회도가 0.001을 넘어서는 상대적으로 큰 값을 공통적으로 보이고 있는 것을 확인 할 수 있다. 네 개의 평가인자를 기반으로 산정한 각 대안의 종합적인 순위를 Table 5.13에 나타냈다.

절대적인 평가인자를 기반한 PA1과 PA3에서 1순위 대안이 ALT6이고 제일 낮은 순위가 ALT2라는 공통점을 찾을 수 있다. 마찬가지로 상대적인 평가인자인 PA2와 PA4에서도 1순위 대안이 모두 ALT5이고, 가장 낮은 순위가 ALT1이라는 공통된 특징을 발견할 수 있다. 따라서 절대적 평가인자를 기준으로 보았을 때는 안동댐과 임하댐의 최저수위를 조합하여 하강시키는 대안이 적절하고 상대적 평가인자를 기준으로 삼았을 때는 임하댐의 최저수위만을 하강시키는 대안이 적절할 것으로 판단된다. 네 개의 인자를 종합하여 각 대안 별로 평균 순위를 Table 5.13의 가장 하단의 행에 도출한 결과 안동댐과 임하댐의 최저수위를 함께 하강시키는 대안인 ALT6이 1순위이고 그 뒤로 ALT5, ALT4, ALT3, ALT2, ALT1 순서로 가장 높은 순위를 가진 것을 확인하였다.

**Table 5.9 Regret of amount of water supply in alternatives and ranks
(SCN1 ~ SCN25)**

	ALT1	ALT2	ALT3	ALT4	ALT5	ALT6
SCN1	10,506	46,859	16,831	0	70,250	23,171
SCN2	49,677	36,722	42,128	44,451	0	20,542
SCN3	5,254	539	72	0	24,611	10,074
SCN4	19,375	22,467	11,827	14,149	4,467	0
SCN5	12,961	0	5,451	7,699	3,326	3,062
SCN6	18,952	10,365	4,485	16,305	5,357	0
SCN7	27,850	0	13,382	25,216	35,339	30,783
SCN8	26,980	0	12,513	24,367	2,479	11,248
SCN9	7,839	9,786	7,210	0	23,301	11,922
SCN10	10,543	14,489	9,914	2,704	487	0
SCN11	14,764	0	7,215	9,538	23,314	16,259
SCN12	19,991	0	5,523	17,378	23,886	16,467
SCN13	7,548	6,235	0	2,285	26,411	5,392
SCN14	7,548	5,165	0	2,322	41,628	16,342
SCN15	14,470	541	0	11,828	58,656	15,270
SCN16	50,476	24,997	36,008	47,863	0	22,039
SCN17	10,452	54,829	16,742	0	89,882	28,982
SCN18	63,122	55,561	56,196	57,887	0	28,359
SCN19	27,851	0	13,383	25,238	8,199	16,379
SCN20	19,830	7,021	12,282	14,532	0	6,209
SCN21	15,137	10,156	7,589	9,911	4,079	0
SCN22	7,548	1,693	0	2,228	44,510	18,678
SCN23	52,572	24,708	38,104	49,959	0	23,962
SCN24	7,839	9,793	7,210	0	44,710	20,447
SCN25	90,283	96,303	86,093	85,057	0	19,809
Max Regret	90,283	96,303	86,093	85,057	89,882	30,783
Rank	5	6	3	2	4	1

Table 5.10 Regret of reliability of water supply in alternatives and ranks (SCN1 ~ SCN25) (unit: 1×10^{-3})

	ALT1	ALT2	ALT3	ALT4	ALT5	ALT6
SCN1	6.601	7.058	6.997	6.297	0.000	3.346
SCN2	3.438	2.738	3.103	3.346	0.000	1.643
SCN3	9.735	6.723	9.674	9.552	0.000	6.206
SCN4	6.662	4.807	6.571	6.571	0.000	4.076
SCN5	5.537	5.172	5.567	5.293	0.000	2.799
SCN6	9.643	5.963	9.248	9.613	0.000	6.388
SCN7	11.438	8.761	11.225	11.408	0.000	6.693
SCN8	4.289	3.498	4.107	4.229	0.000	2.221
SCN9	9.796	9.978	10.069	9.583	0.000	5.050
SCN10	6.145	5.050	6.145	5.963	0.000	3.651
SCN11	9.339	8.275	9.278	9.248	0.000	5.172
SCN12	12.077	8.031	11.803	11.955	0.000	7.818
SCN13	8.427	6.388	8.335	8.305	0.000	4.928
SCN14	11.743	7.484	11.651	11.590	0.000	7.849
SCN15	11.286	7.909	11.043	11.225	0.000	6.936
SCN16	5.902	4.685	5.658	5.871	0.000	3.316
SCN17	8.609	8.335	8.944	8.396	0.000	4.533
SCN18	3.103	3.103	3.012	2.890	0.000	1.308
SCN19	5.537	4.867	5.202	5.476	0.000	2.860
SCN20	7.970	5.324	7.970	7.818	0.000	5.415
SCN21	8.913	6.541	8.883	8.792	0.000	5.567
SCN22	17.005	9.035	16.945	16.884	0.000	12.168
SCN23	2.860	2.251	2.647	2.829	0.000	1.339
SCN24	8.670	8.761	8.883	8.457	0.000	4.502
SCN25	2.920	3.103	2.890	2.677	0.000	0.943
Max Regret	17.005	9.978	16.945	16.884	0.000	12.168
Rank	6	2	5	4	1	3

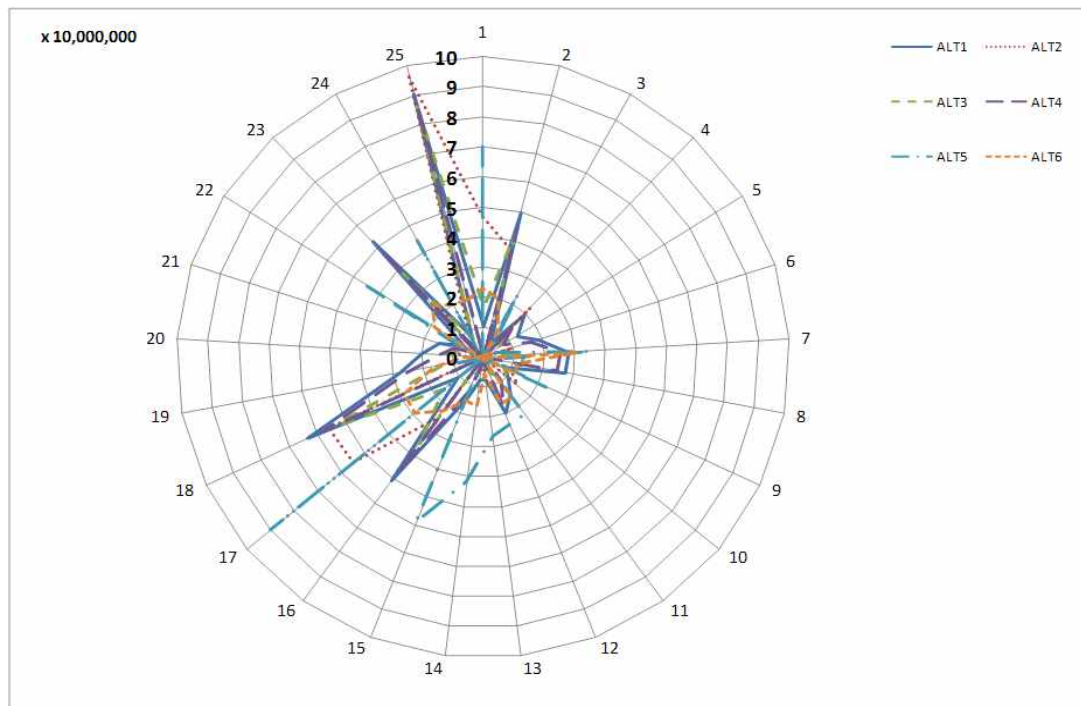


Figure 5.6 Regret of amount of water supply in alternatives (SCN1 ~ SCN25)

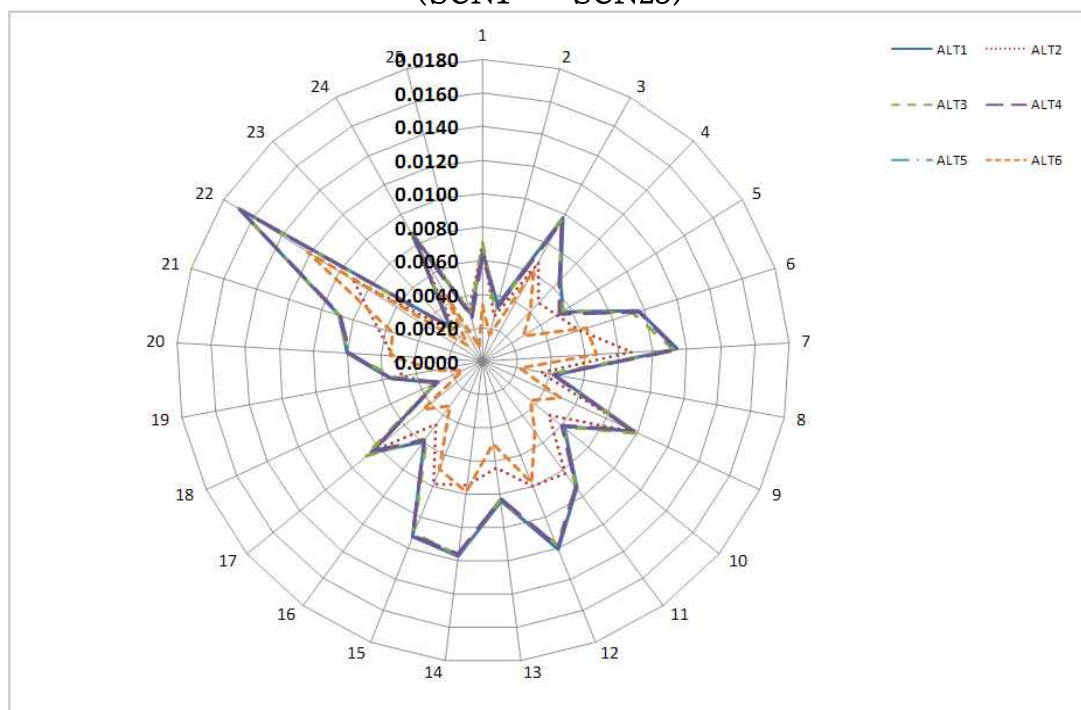


Figure 5.7 Regret of reliability of water supply in alternatives (SCN1 ~ SCN25)

**Table 5.11 Regret of amount of spill in alternatives and ranks
(SCN1 ~ SCN25)**

	ALT1	ALT2	ALT3	ALT4	ALT5	ALT6
SCN1	58,593	436,760	212,939	0	365,109	147,057
SCN2	298,875	520,224	401,600	260,082	0	112,647
SCN3	19,606	191,451	70,969	0	115,995	23,425
SCN4	143,825	484,282	246,550	105,032	33,159	0
SCN5	39,059	260,360	142,067	0	39,771	1,691
SCN6	274,211	282,451	274,211	273,961	0	127,983
SCN7	153	267	153	0	1,515	593
SCN8	151,825	269,059	203,188	132,429	0	65,095
SCN9	38,793	260,085	141,518	0	121,903	66,606
SCN10	113,087	349,219	215,812	74,294	0	29,281
SCN11	38,793	246,715	141,518	0	174,488	86,000
SCN12	129,558	140,214	129,558	129,558	0	61,738
SCN13	39,067	346,831	141,793	0	232,591	43,989
SCN14	19,396	130,701	70,759	0	131,277	61,633
SCN15	218	210	202	0	882	603
SCN16	304,798	433,181	356,161	285,402	0	123,758
SCN17	58,189	583,788	212,277	0	573,900	172,706
SCN18	396,334	657,715	503,676	357,468	0	174,393
SCN19	73,645	184,416	125,007	54,248	0	24,604
SCN20	185,641	297,398	237,004	165,712	0	78,986
SCN21	120,533	290,390	171,896	101,137	0	2,623
SCN22	20,099	130,354	71,462	0	130,667	61,057
SCN23	390,244	500,918	441,607	370,848	0	177,869
SCN24	38,793	260,142	141,518	0	243,667	111,650
SCN25	484,362	729,091	560,656	464,966	0	222,855
Max Regret	484,362	729,091	560,656	464,966	573,900	222,855
Rank	3	6	4	2	5	1

**Table 5.12 Regret of reliability of non-spill in alternatives and ranks
(SCN1 ~ SCN25) (unit: 1×10^{-3})**

	ALT1	ALT2	ALT3	ALT4	ALT5	ALT6
SCN1	0.030	0.335	0.183	0.000	0.304	0.091
SCN2	0.152	0.243	0.213	0.152	0.000	0.091
SCN3	0.030	0.030	0.061	0.000	0.000	0.000
SCN4	0.122	0.487	0.243	0.122	0.091	0.000
SCN5	0.061	0.152	0.152	0.000	0.152	0.122
SCN6	0.487	0.487	0.487	0.456	0.000	0.213
SCN7	0.030	0.061	0.030	0.000	0.152	0.061
SCN8	0.122	0.152	0.152	0.122	0.000	0.091
SCN9	0.000	0.274	0.061	0.000	0.183	0.000
SCN10	0.335	0.365	0.335	0.335	0.000	0.183
SCN11	0.030	0.122	0.122	0.000	0.030	0.030
SCN12	0.243	0.304	0.243	0.243	0.000	0.091
SCN13	0.243	0.335	0.304	0.183	0.061	0.000
SCN14	0.030	0.183	0.030	0.000	0.213	0.061
SCN15	0.061	0.030	0.030	0.000	0.091	0.061
SCN16	0.213	0.335	0.274	0.213	0.000	0.061
SCN17	0.030	0.243	0.061	0.000	0.274	0.061
SCN18	0.365	0.365	0.365	0.365	0.000	0.213
SCN19	0.061	0.122	0.091	0.061	0.000	0.030
SCN20	0.152	0.152	0.152	0.091	0.030	0.000
SCN21	0.000	0.091	0.030	0.000	0.030	0.000
SCN22	0.091	0.061	0.122	0.000	0.122	0.030
SCN23	1.521	1.460	1.460	1.521	0.000	1.156
SCN24	0.030	0.091	0.061	0.000	0.122	0.061
SCN25	0.304	0.395	0.365	0.304	0.000	0.152
Max Regret	1.521	1.460	1.460	1.521	0.304	1.156
Rank	5	3	3	5	1	2

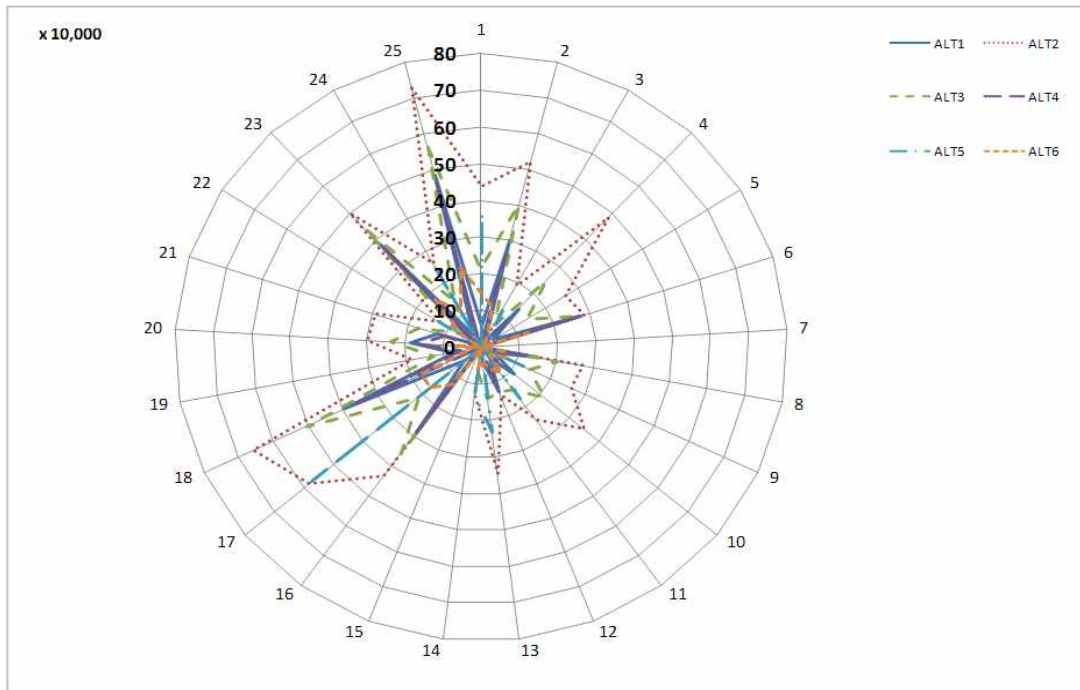


Figure 5.8 Regret of Amount of spill in alternatives
(SCN1 ~ SCN25)

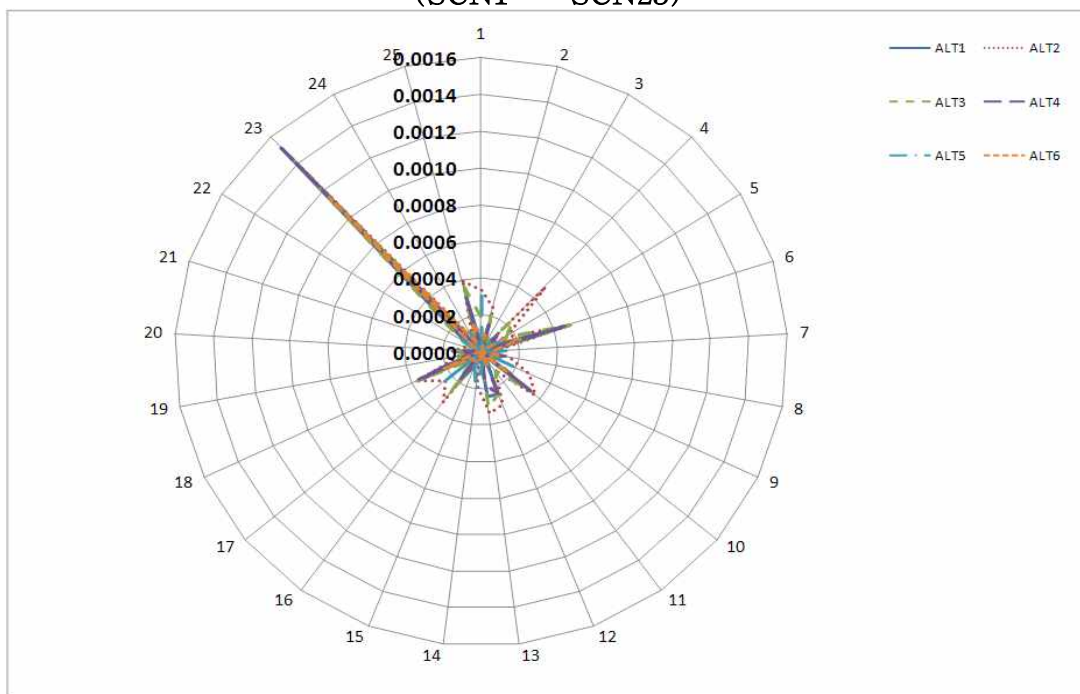


Figure 5.9 Regret of Reliability of non-spill in alternatives
(SCN1 ~ SCN25)

Table 5.13 Estimation regret and ranks in performance indices with RDM

Performance index	Estimation value	ALT1	ALT2	ALT3	ALT4	ALT5	ALT6
PA1 (Amount of water supply)	Max regret	90,283	96,303	86,093	85,057	89,882	30,783
	Rank	5	6	3	2	4	1
PA2 (Reliability of water supply)	Max regret	0.017005	0.009978	0.016945	0.016884	0.000000	0.012168
	Rank	6	2	5	4	1	3
PA3 (Amount of spill)	Max regret	484,362	729,091	560,656	464,966	573,900	222,855
	Rank	3	6	4	2	5	1
PA4 (Reliability of non-spill)	Max regret	0.001521	0.001460	0.001460	0.001521	0.000304	0.001156
	Rank	5	3	3	5	1	2
Average rank in PA1 ~ PA4		4.75	4.25	3.75	3.25	2.75	1.75

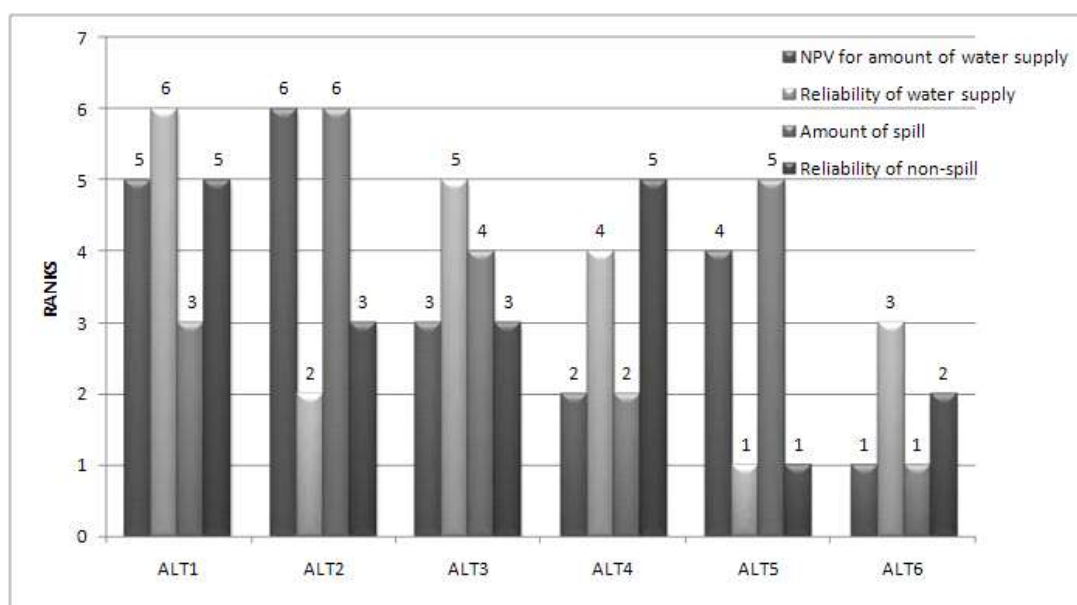


Figure 5.10 Ranks of alternatives with RDM

5.2.4 대안 순위 비교분석

본 절에서는 관측 시나리오의 대안 순위와 ODM과 RDM을 사용한 미래 시나리오에 의해 계산된 대안 순위를 비교하여 과거와 미래시나리오를 사용했을 경우의 순위 결과를 면밀히 분석하고 ODM과 RDM의 순위 결과를 비교하여 두 의사결정 기법을 사용한 차이를 확인하였다.

관측시나리오와 ODM, RDM의 순위 결과를 Table 5.14와 같이 정리하였다. 먼저 관측 시나리오와 ODM과 RDM을 사용한 미래시나리오를 비교하면 평가인자 PA1의 경우 관측시나리오에서는 ALT3이 1순위인 반면 ODM과 RDM에서는 ALT6이 1순위로 도출되었다. 관측시나리오의 순위와 각 기법의 순위 차를 비교하면 ODM에서 평균 2순위가 차이 나고 RDM에서는 1.33순위 차이가 난다. 평가인자 PA2인 경우 관측시나리오와 미래시나리오 모두에서 ALT5가 1순위의 대안으로 선정되었다. 관측시나리오와 ODM과 RDM을 사용한 미래시나리오의 순위 결과차이를 살펴보면 두 기법 모두 약 1.33순위 차이를 보이는 것을 확인할 수 있다. 평가인자 PA3에서는 관측시나리오의 경우 ALT4가 1순위의 대안으로 선정되었고 ODM과 RDM을 사용한 미래시나리오에서는 ALT6이 1순위 대안으로 선택되었다. 관측시나리오와 미래 시나리오 간의 순위 격차를 살펴보면 ODM은 2순위, RDM은 1순위 격차가 나타났다. 마지막으로 평가인자 PA4를 분석하면 관측시나리오에서는 ALT2가 1순위가 된 반면 두 기법을 사용한 미래시나리오에서 관측시나리오에서 6순위로 평가된 ALT5가 1순위가 되었다. 관측시나리오와 ODM과 RDM을 사용한 미래시나리오의 결과를 비교하면 ODM과 RDM 모두 약 1.83순위 차를 보였다. 네 가지 평가인자를 비교 분석한 결과 관측시나리오의 추세를 반영할 때와 미래 시나리오를 반영했을 때의 대안의 순위 결과가 달라질 수 있음을 알 수 있고 ODM보다 RDM이 관측시나리오와의 순위 격차가 상대적으로 작은 것으로 확인되었다.

미래시나리오인 ODM과 RDM의 순위 결과를 비교하면 평가인자 PA1

은 1순위 대안인 ALT6를 제외하고 나머지 대안들에서 모두 순위의 차이가 보이는 것을 알 수 있다. 특히 ALT2대안의 경우 ODM에서는 3순위, RDM에서는 6순위로 3순위라는 큰 차이가 나는 것을 확인할 수 있다. 평가인자 PA2에서는 ODM과 RDM의 순위 차이가 가장 적은 것을 볼 수 있는데 ALT2과 ALT3의 대안에서만 순위 차이를 나타내었다. 평가인자 PA3의 경우는 1순위와 6순위 대안을 제외한 나머지 대안에서 모두 순위 차이를 보였다. 특히 ALT2에서 ODM는 2순위, RDM에서는 5순위라는 큰 차이를 보였다. 평가인자 PA4에서 1순위와 2순위 대안이 일치하고 나머지 대안에서 순위 차를 보였다. 특히 ALT4에서 ODM은 3순위를 RDM은 5순위를 도출하여 그 결과가 크게 차이나는 것을 확인하였다. 종합적으로 순위의 차이를 살펴보면, 용수공급량 PA1과 여수로비 방류 신뢰도 PA3은 평균적으로 1.33순위로 가장 차이가 크고 여수로 방류량 PA3은 평균 1순위의 차이가 나며 용수공급 신뢰도 PA4는 0.33순위로 가장 차이가 작았다.

Table 5.14 Estimation ranks in performance indices with ODM, RDM and observed scenario

Performance index	DM method or scenario	ALT1	ALT2	ALT3	ALT4	ALT5	ALT6
PA1 (Amount of water supply)	ODM	6	3	2	4	5	1
	RDM	5	6	3	2	4	1
	Observed scenario	3	6	1	2	5	4
PA2 (Reliability of water supply)	ODM	6	3	5	4	1	2
	RDM	6	2	5	4	1	3
	Observed scenario	5	3	2	4	1	6
PA3 (Amount of spill)	ODM	4	6	5	3	2	1
	RDM	3	6	4	2	5	1
	Observed scenario	3	6	2	1	5	4
PA4 (Reliability of non-spill)	ODM	4	6	5	3	1	2
	RDM	5	3	3	5	1	2
	Observed scenario	4	1	4	3	6	2

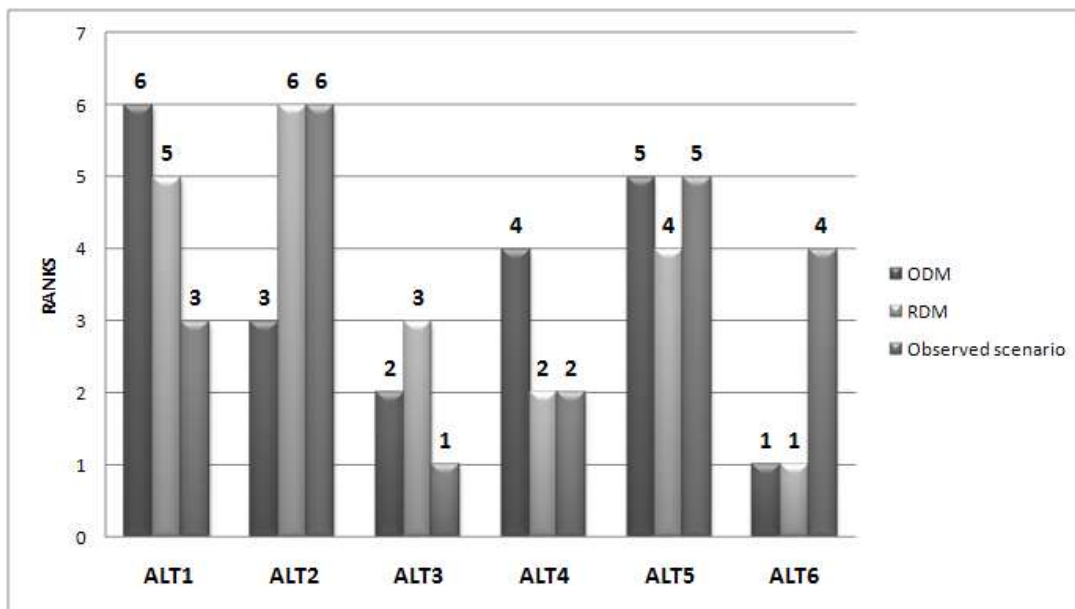


Figure 5.11 Ranks of alternatives in amount of water supply (ODM vs. RDM vs. Observed scenario)

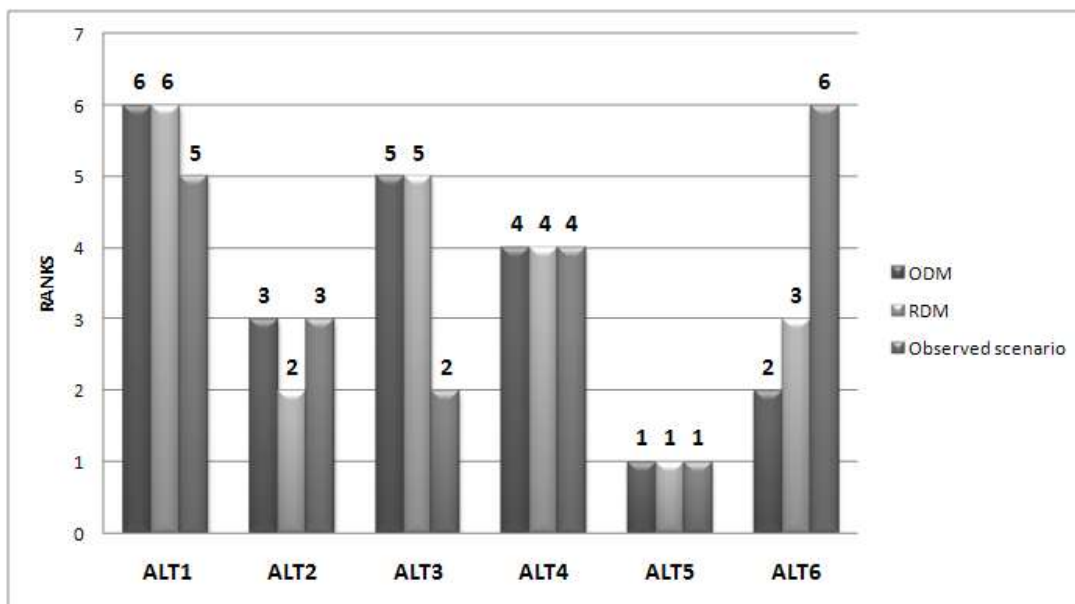


Figure 5.12 Ranks of alternatives in reliability of water supply (ODM vs. RDM vs. Observed scenario)

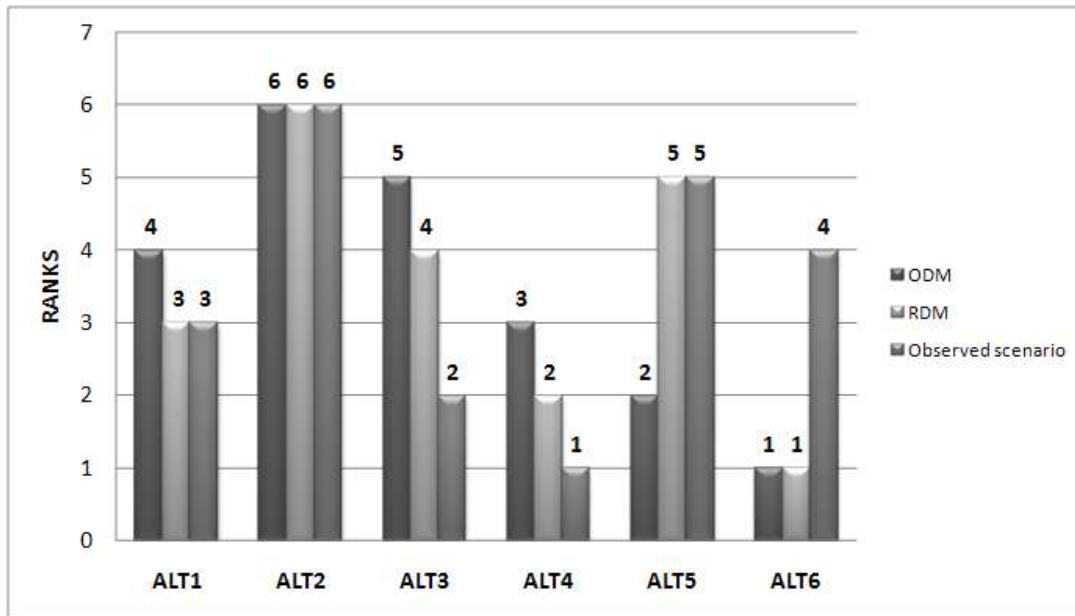


Figure 5.13 Ranks of alternatives in amount of spill (ODM vs. RDM vs. Observed scenario)

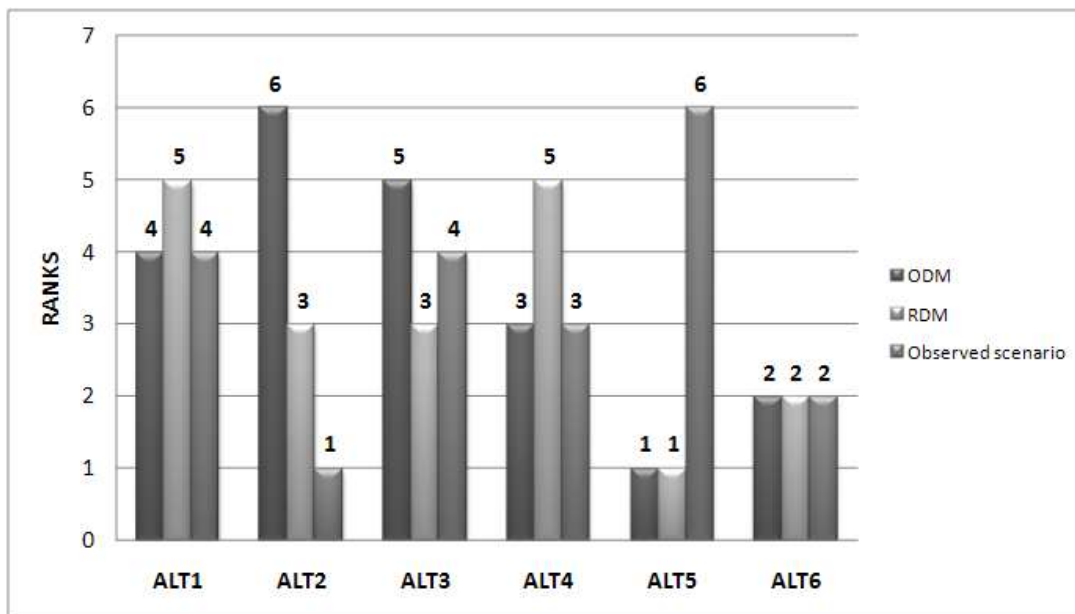


Figure 5.14 Ranks of alternatives in reliability of non-spill (ODM vs. RDM vs. Observed scenario)

Table 5.15 Differences of ranks in performance indices between ODM and RDM

	ALT1	ALT2	ALT3	ALT4	ALT5	ALT6	Total	Average
PA1	1	3	1	2	1	0	8	1.33
PA2	0	1	0	0	0	1	2	0.33
PA3	1	0	1	1	3	0	6	1.00
PA4	1	3	2	2	0	0	8	1.33

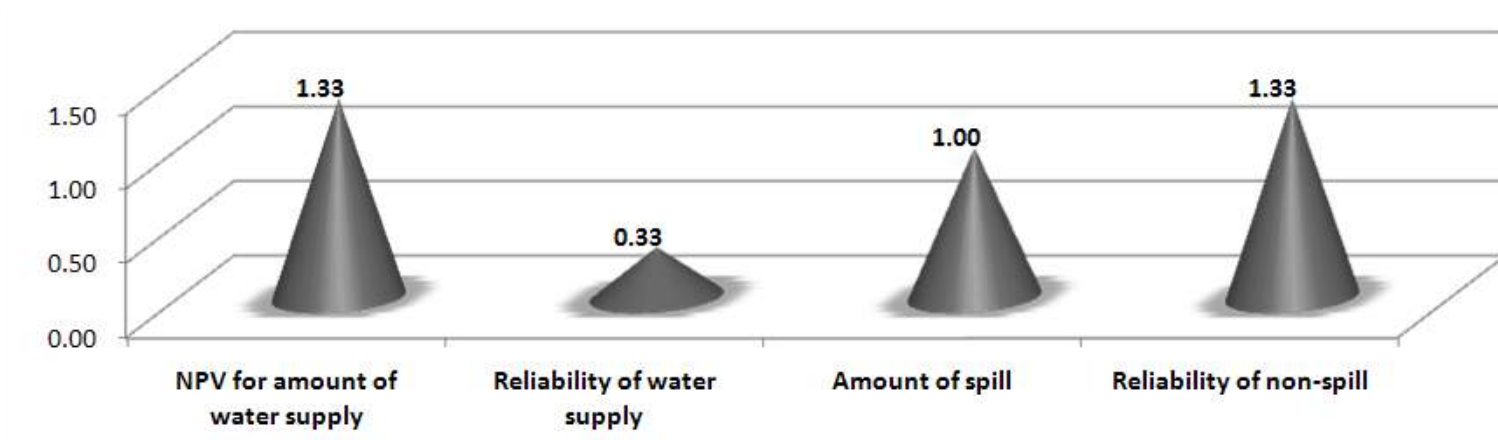


Figure 5.15 Average differences of ranks in performance indices between ODM and RDM

제 6 장 로버스트 의사결정의 효과

제 5장에서는 ODM과 RDM에 의하여 안동댐과 임하댐 유역에 가상적으로 용수공급계획을 위한 대안을 설정 하여 저수지 운영 능력을 다양한 성능인자로 평가하여 대안의 순위를 산정하였다. 그 결과 미래 시나리오를 적용했을 시 ODM과 RDM의 기법에 따라 순위의 격차가 발생하는 것을 5.2.4절에서 확인하였다. 본 장에서는 제 5장의 성능인자 중 PA1의 ‘용수공급량’ 결과를 이용하여 RDM 의사결정 기법이 ODM보다 기후변화와 같은 상황 하에서 왜 효과가 있는지에 대해 ‘시나리오 선택 (scenario selecting)’의 관점에서 정량적으로 입증하도록 하겠다.

6.1 기후변화 시나리오와 의사결정

수자원 부문의 기후변화 연구에서는 배출시나리오와 GCM으로부터 산출된 기후시나리오가 매우 많다. 그러나 그 중 어떤 시나리오가 미래에 발생할지에 대한 가능성(likelihood)은 매우 불확실하다. 따라서 이러한 상황하에서는 분석자 혹은 의사결정자는 수많은 시나리오 중 어떤 시나리오를 어떻게 선택할 것인가에 대한 문제에 부딪히게 된다. 사실상 본질적으로 이 문제는 시나리오의 가능성을 잘 알 수 없다는 전제 하에 처음부터 놓여 있으므로 최적의 시나리오를 찾아내는 것은 힘들다고 볼 수 있다. 이러한 상태에서 대처할 수 있는 최선의 방안은 시나리오의 발현 가능성에 대한 정보의 부족으로부터 오는 위험을 줄이려고 하기보다 회피(hedging)하기 위한 방향으로 나아가는 것이다. 이를 위해서는 시나리오 선택의 영향을 덜 받을 수 있는 의사결정 기법으로 대안의 순위를 산정해야 한다.

이러한 맥락에서 본 장에서는 여러 개의 시나리오 중 특정수의 시나리오를 선택한다는 상황을 가정하여 ODM과 RDM중 어떠한 기법으로 대

안의 순위를 산정하는 것이 시나리오 선택에 의한 영향을 덜 받는지에 대해 연구를 진행하였다. 이를 위해 제 5장에서 사용하였던 25개의 기후 변화 시나리오 중 $n(=5, 10, 15, 20)$ 개를 선택하는 상황을 가정하여 선택할 수 있는 시나리오의 조합의 case를 다양하게 생성하고 각 case에 대해 ODM과 RDM의 기법으로 대안의 순위를 산정하고 각 대안 별 순위의 변동을 분석하여 시나리오 선택에 의한 ODM과 RDM의 순위의 영향 정도를 분석하였다.

6.2 기후변화 시나리오 선택 case 별 대안 평가

존재하는 시나리오 중 몇 개의 시나리오를 선택해야 한다는 상황을 가정할 시 ODM과 RDM을 이용하여 산정된 대안의 순위 중 어느 의사결정 기법을 사용하는 것이 시나리오 선택에 의한 영향을 덜 받는가에 대해 평가하고자 한다. 연구 설계 및 흐름도는 Figure 6.1과 같다. 먼저 제 4장과 제 5장에서 사용하였던 Table 4.2의 시나리오 25개 중 분석자가 n 개 선택한다는 가정을 하고 25개 시나리오 중 선택할 수 있는 n 개의 모든 case를 생성한다. 그 후 생성한 각 case에 대해 시나리오 별 첫 번째 평가인자였던 용수공급량 PA1을 작성하고 ODM과 RDM을 이용하여 기댓값과 후회도를 산정하여 순위를 매긴다. 이러한 방식으로 모든 case에 대하여 ODM과 RDM을 이용해 각 대안 별 순위를 산정한 후 case에 따라 각 대안의 순위의 변동 정도를 표준편차로 평가하여 ODM과 RDM을 평가한다.

6.2.1 시나리오 선택의 case 생성

먼저 n 개를 선택했을 시의 다양한 시나리오 선택 그룹 case를 생성하였다. 사용할 Table 4.2의 시나리오를 살펴보면 배출시나리오 A1B가 10개, B1 10개, A2 5개로 구성되어 있는 것을 알 수 있다. 따라서 시나리오 선

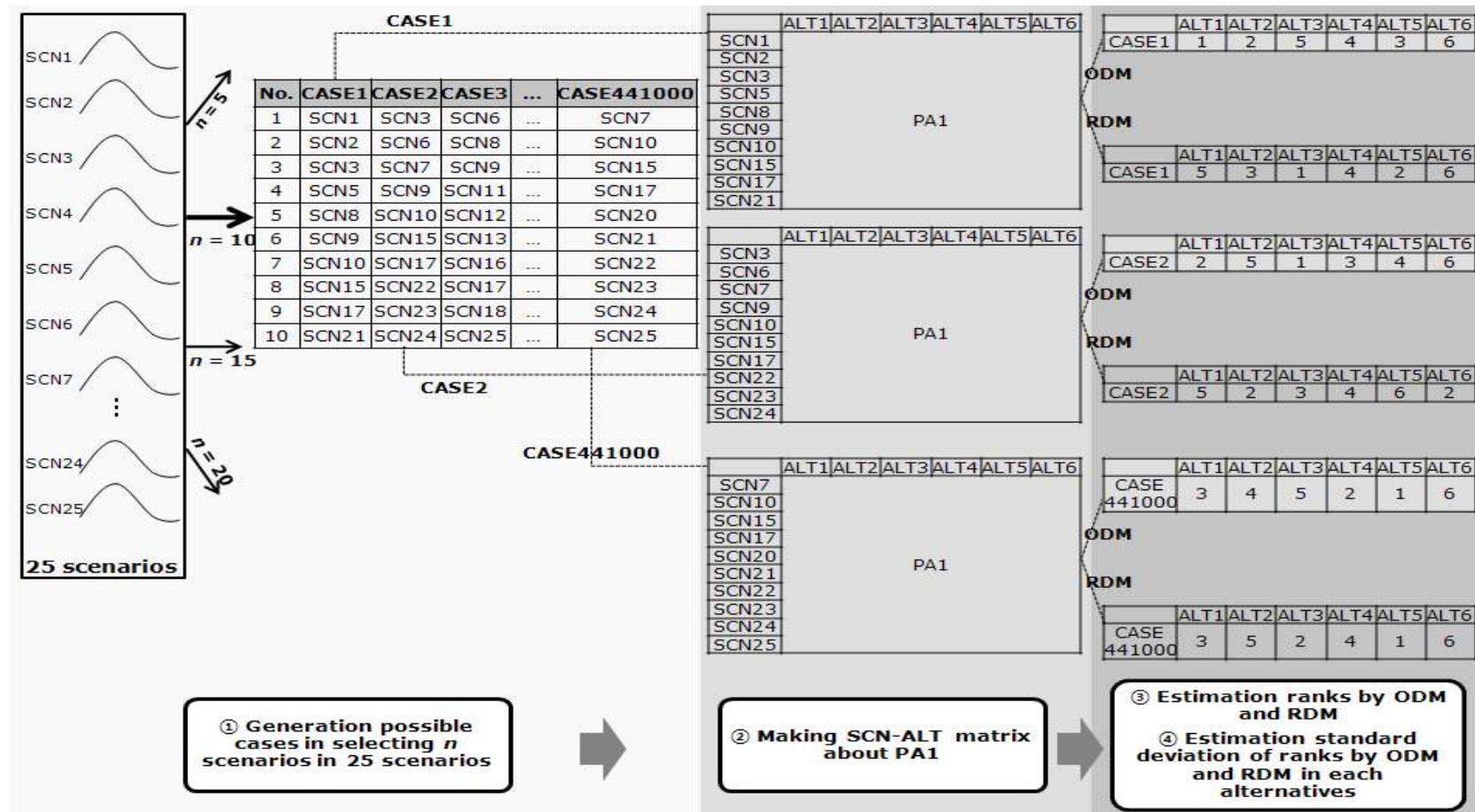


Figure 6.1 Research flowchart for analysis of effectiveness for ODM and RDM in selecting scenarios

택시, 특정 배출시나리오의 편중을 줄이고 25개의 시나리오의 전체의 특성을 최대한 그대로 반영하기 위하여 25개 시나리오의 배출시나리오 비율에 근거하여 case를 Table 6.1과 같이 생성하였다. 25개의 시나리오들의 배출시나리오 비중을 살펴보면 식(6.1)과 같다.

$$A1B: B1: A2 = 2: 2: 1 \quad (6.1)$$

따라서 Table 6.1을 살펴보면 25개 중 5개를 선택할 경우 식(6.1)의 비율에 근거하여 A1B에서 2개, B1에서 2개, A2에서 1개를 선택하였다. 마찬가지로 10개를 선택할 시에는 A1B에서 4개, B1에서 4개, A2에서 1개를 선택하였다. 15개와 20개를 선택할 때에도 동일한 비율을 적용하였다. 그 결과 Table 6.1의 세 번째 열의 식에 의해 5개와 20개를 선택할 시 총 441,000 case가 생성되었고 10개와 15개를 선택할 때에는 총 10,125 case가 생성되었다.

6.2.2 대안 순위 및 변동성 평가

(1) case 별 대안 순위

총 25개의 시나리오 중 5, 10, 15, 20 개의 시나리오 선택 시 Table 5.2의 첫 번째 평가인자인 용수공급량 PA1을 각 case 별로 Table 5.1 ALT1 ~ ALT6의 6개 대안에 대하여 작성하였다. 작성된 PA1을 ODM과 RDM을 이용하여 대안의 순위를 산정하였다. 어떤 case를 채택하는가에 따라 대안의 순위가 변하는 것을 나타내기 위해 전체 case의 일부인 CASE1000 ~ CASE1050의 순위 결과를 Figure 6.2 ~ Figure 6.9로 나타내었다. Figure 6.2와 Figure 6.3은 5개의 시나리오를 선택한 case에서 ODM과 RDM을 사용하여 각 대안의 순위를 매겼을 때의 결과를 나타낸 것이고 Figure 6.4와 Figure 6.5는 10개의 시나리오를 선택했

Table 6.1 Number of possible cases by selecting n scenarios in 25 scenarios

Number of selecting scenarios (n)	Emission scenarios (Number of GCMs)	Total possible case	Case index
5	A1B(2), B1(2), A2(1)	$10,125 (= {}_{10}C_2 \times {}_{10}C_2 \times {}_5C_1)$	CASE1 ~ CASE10125
10	A1B(4), B1(4), A2(2)	$441,000 (= {}_{10}C_4 \times {}_{10}C_4 \times {}_5C_2)$	CASE1 ~ CASE441000
15	A1B(6), B1(6), A2(3)	$441,000 (= {}_{10}C_6 \times {}_{10}C_6 \times {}_5C_3)$	CASE1 ~ CASE441000
20	A1B(8), B1(8), A2(4)	$10,125 (= {}_{10}C_8 \times {}_{10}C_8 \times {}_5C_4)$	CASE1 ~ CASE10125

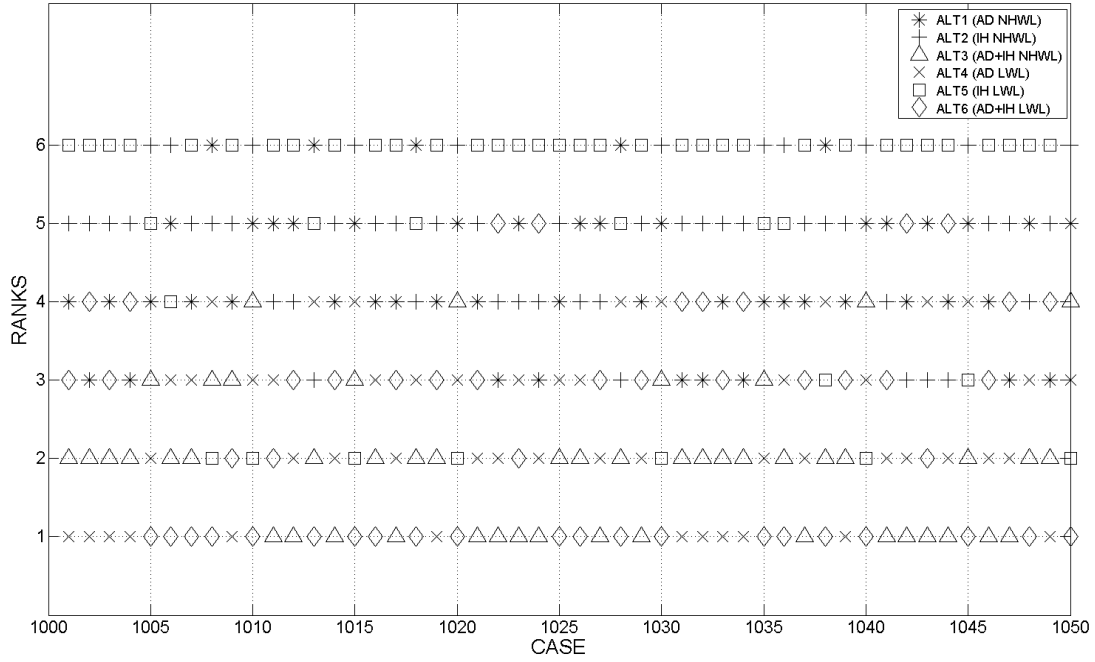


Figure 6.2 Ranks about PA1 with ODM in CASE1000 ~ CASE1050
when selecting 5 scenarios in 25 scenarios

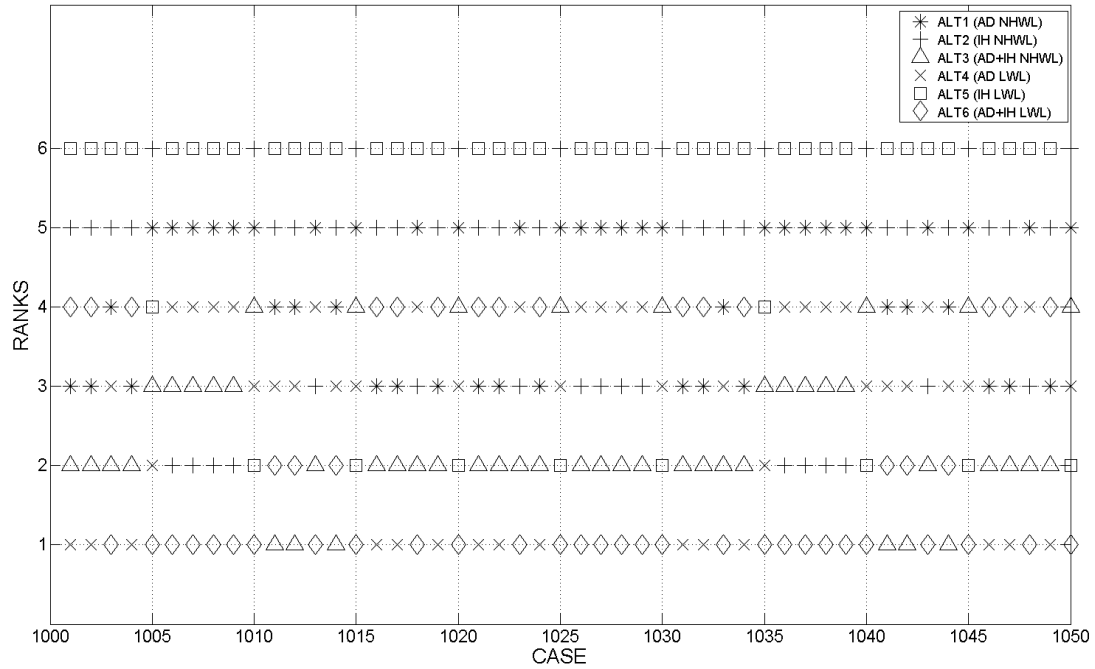


Figure 6.3 Ranks about PA1 with RDM in CASE1000 ~ CASE1050
when selecting 5 scenarios in 25 scenarios

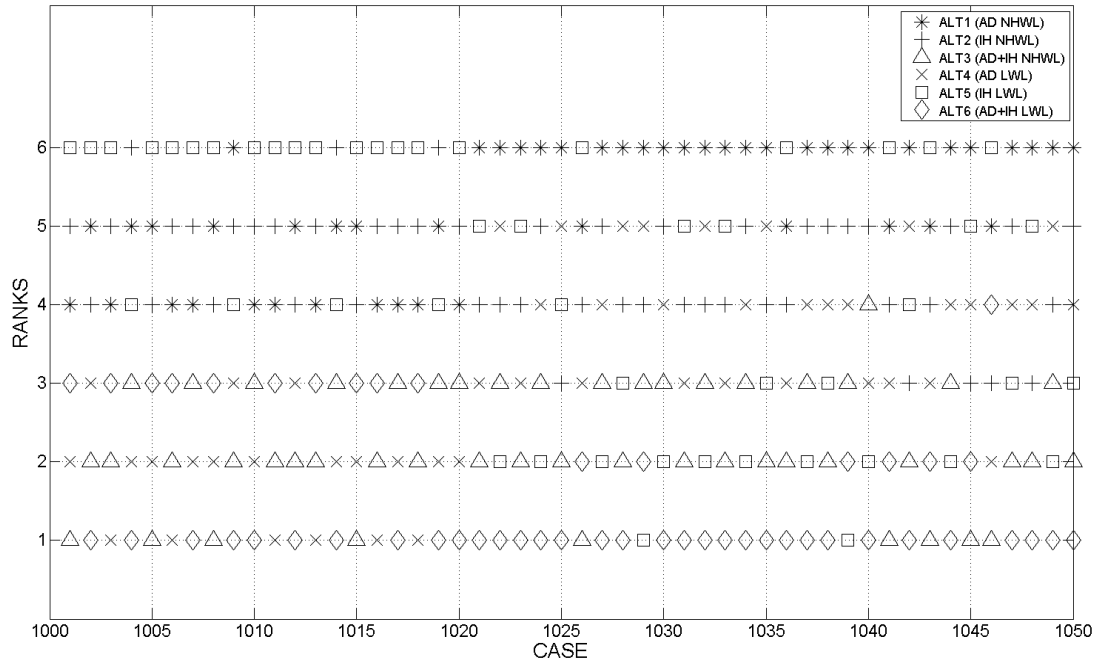


Figure 6.4 Ranks about PA1 with ODM in CASE1000 ~ CASE1050
when selecting 10 scenarios in 25 scenarios

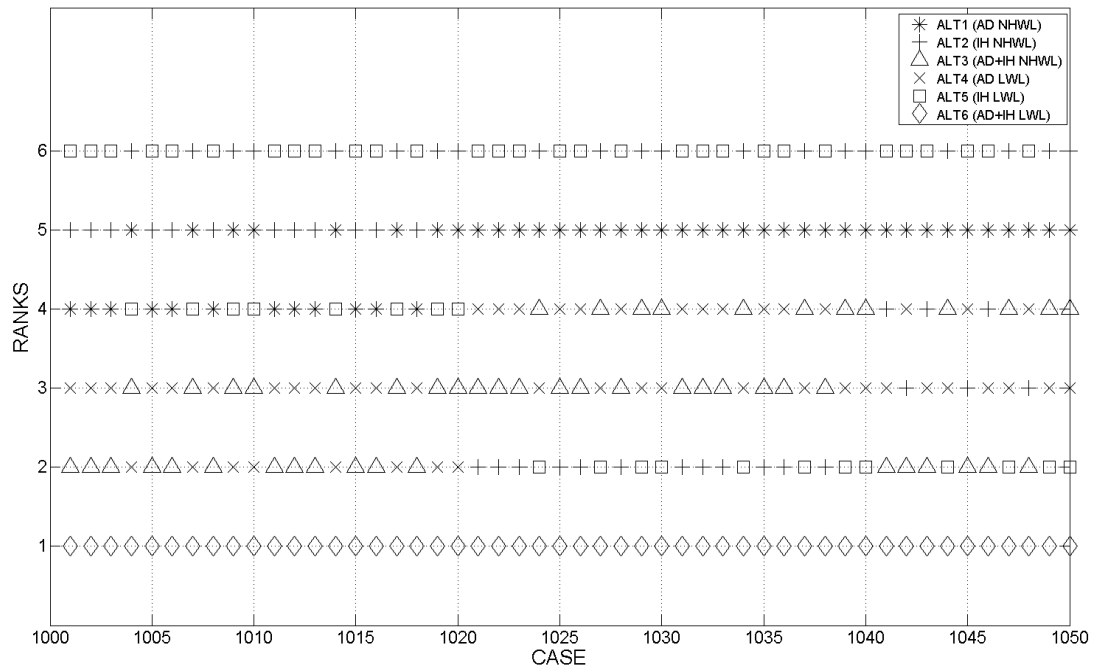


Figure 6.5 Ranks about PA1 with RDM in CASE1000 ~ CASE1050
when selecting 10 scenarios in 25 scenarios

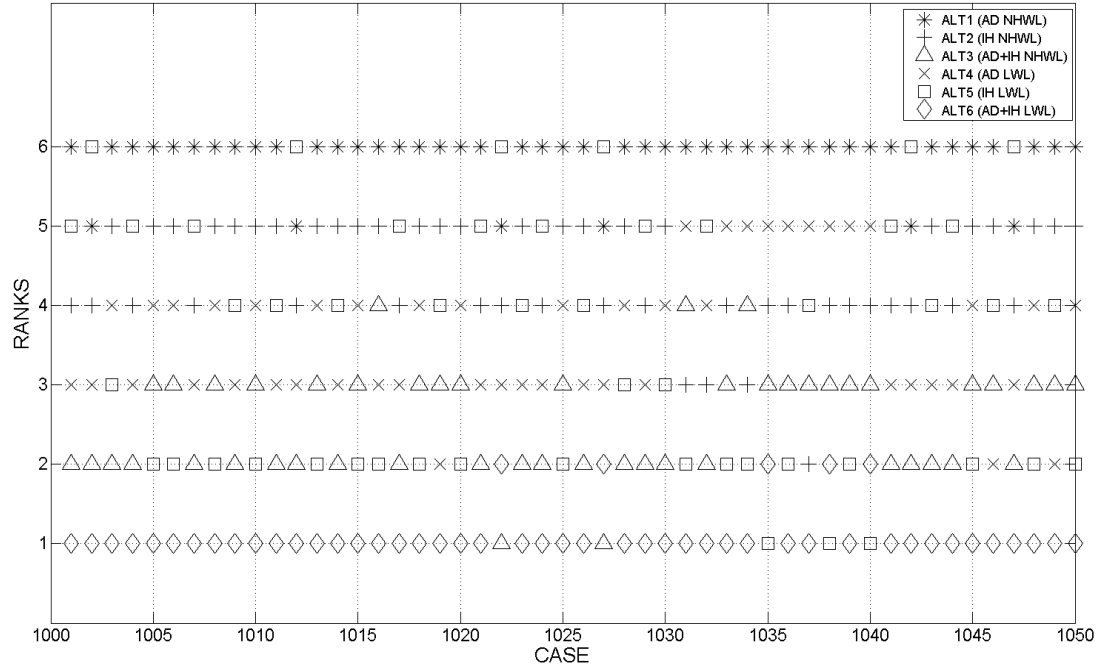


Figure 6.6 Ranks about PA1 with ODM in CASE1000 ~ CASE1050
when selecting 15 scenarios in 25 scenarios

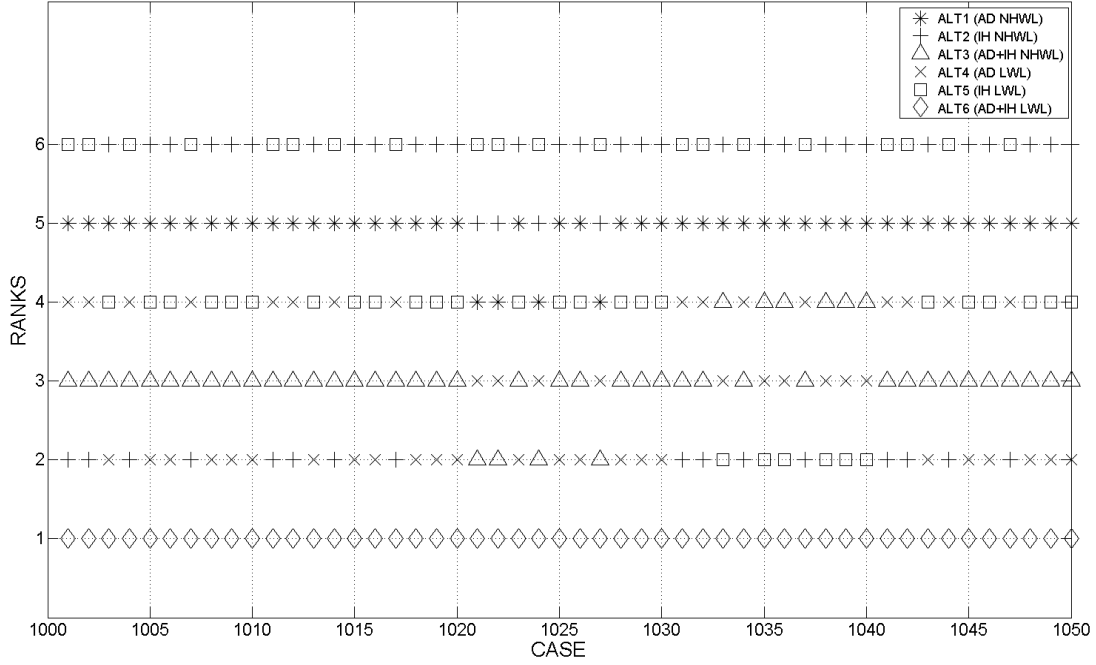


Figure 6.7 Ranks about PA1 with RDM in CASE1000 ~ CASE1050
when selecting 15 scenarios in 25 scenarios

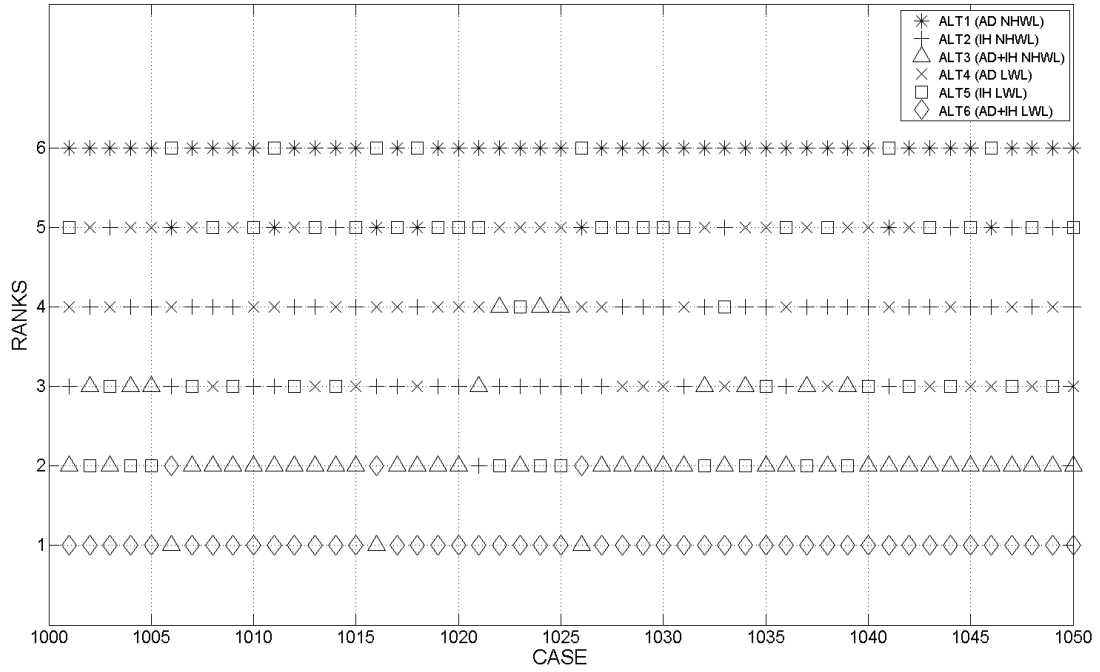


Figure 6.8 Ranks about PA1 with ODM in CASE1000 ~ CASE1050
when selecting 20 scenarios in 25 scenarios

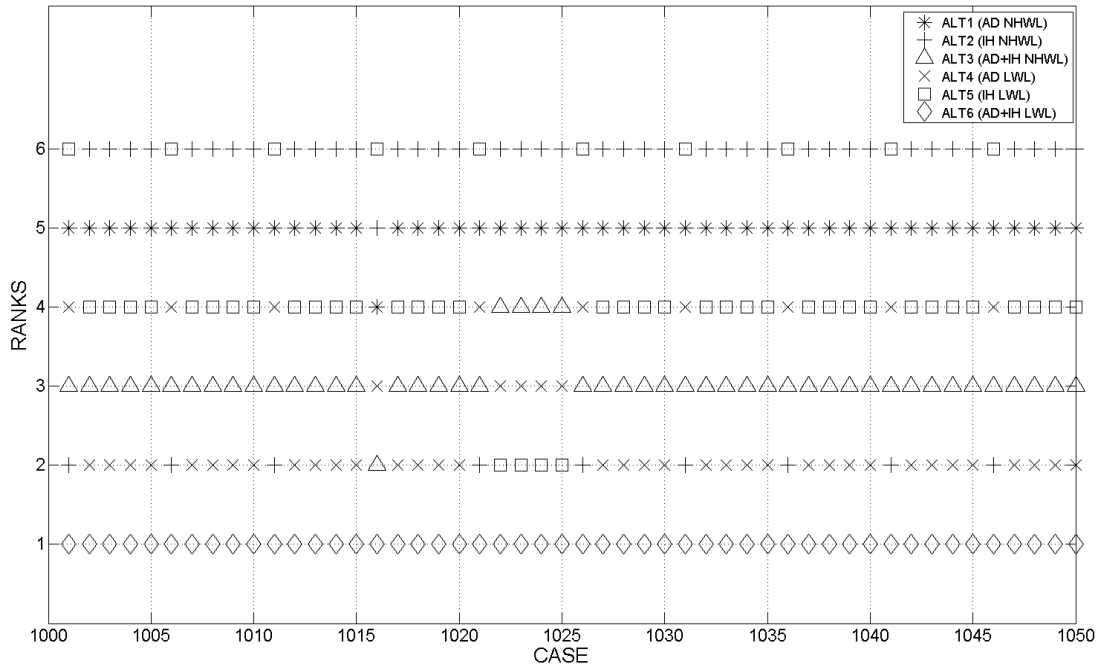


Figure 6.9 Ranks about PA1 with RDM in CASE1000 ~ CASE1050
when selecting 20 scenarios in 25 scenarios

을 때의 순위, Figure 6.6과 Figure 6.7은 15개의 시나리오를 선택했을 때의 순위, Figure 6.8과 Figure 6.9는 20개의 시나리오를 선택했을 때의 결과를 보여준 것이다. 어떤 시나리오를 선택하는가에 따라 대안의 순위가 다양하게 변하는 것을 볼 수 있고, 같은 시나리오를 선택함에도 불구하고 ODM이나 RDM 중 어느 의사결정 기법을 사용하는가에 따라 각 대안의 순위가 달라지는 것을 확인 할 수 있다.

(2) 순위 변동성 산정

시나리오 선택 수에 따라 case 별 순위를 산정한 후 순위의 변동성을 측정하기 위해 표준편차를 식 (6.2)와 (6.3)에 의해 산정하였다. 전체 m 개의 대안 중 j 번째 CASE(C_j)에서 i 번째 대안(A_i)의 순위의 평균($R_m(A_i)$)를 구한 뒤 각 순위의 편차의 평균을 구하면 순위의 표준편차를 $\sigma(A_i)$ 를 구할 수 있다.

$$R_m(A_i) = \frac{\sum_{j=1}^m R(A_i, C_j)}{m} \quad (6.2)$$

$$\sigma_R(A_i) = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m (R(A_i, C_j) - R_m(A_i))^2}{m}} \quad (6.3)$$

표준편차를 산정한 결과를 Figure 6.10 ~ Figure 6.13과 같이 나타냈다. Figure 6.10의 5개의 시나리오를 선택할 경우 ALT4와 ALT5대안에서 ODM 순위의 표준편차가 더 크고 나머지 네 개의 대안에서는 작은 결과를 보였다. 여섯 개의 대안의 평균 표준편차의 경우는 RDM의 순위가 ODM의 순위보다 표준편차가 0.02 정도 작은 것을 확인할 수 있다. 10개의 시나리오를 선택했을 경우 Figure 6.11를 살펴보면 ALT2를 제외한 나머지 대안 모두에서 ODM 순위의 표준편차가 RDM 순위의 표준편차

보다 큰 결과를 보였다. 대안들의 표준편차 평균을 보았을 때는 약 0.11 이 RDM 순위의 표준편차가 ODM의 값보다 작은 것을 알 수 있다. Figure 6.12의 15개의 시나리오를 선택하는 경우를 보면 마찬가지로 ALT2 대안을 제외한 나머지 모든 대안에서 RDM 순위 표준편차가 ODM의 값보다 작은 결과를 보였다. 마지막으로 Figure 6.13의 20개의 시나리오를 선택하는 경우 역시 ALT2 대안을 제외한 모든 대안에서 RDM의 표준편차가 ODM 순위의 표준편차보다 작게 나타난다.

결과적으로 일부를 제외한 대부분의 대안에서 시나리오를 선택시 RDM 순위의 표준편차가 ODM 순위의 표준편차보다 작은 것으로 나타났다. ODM 순위의 표준편차가 RDM 순위의 표준편차보다 작은 예외의 경우를 검토해 보면, 5개의 시나리오를 선택할 시 5, 10, 15개를 선택했을 때와 달리 많은 수의 대안에서 ODM 순위의 표준편차가 RDM의 값보다 작게 산정된 것을 볼 수 있다. 이는 25개 시나리오 중 5개라는 상대적으로 작은 수의 시나리오를 추출함으로써 표본오차(sampling error)가 발생해 10, 15, 20개의 시나리오를 선택했을 때와는 다른 결과를 도출했을 가능성이 크다. 한편 ALT2는 5, 10, 15, 20개를 선택한 모든 경우에서 ODM 순위의 표준편차가 RDM 순위의 표준편차보다 크게 산정되었다. 이는 제 5장에서 시나리오 별 성능인자 PA1의 값을 살펴보았을 때 대부분의 시나리오들에서는 성능인자 값의 변화가 거의 반면 소수 몇 개의 시나리오에서 값이 크게 돌출되는 형태를 보여 전체 시나리오의 기댓값을 산정하는 ODM에 비해 최대 후회도를 추출하는 RDM에서 순위의 표준편차가 커졌을 것으로 추정된다. 이 부분을 제외한 나머지는 RDM 순위의 표준편차가 ODM 순위의 표준편차보다 작게 산정된 것으로 보아 시나리오 선택에 의한 대안 순위의 변동이 작은 것으로 판단된다. 이는 시나리오의 발현 가능성에 대한 정보가 부족하여 어떤 시나리오를 선택해야 하는지 알 수 없는 기후변화와 같은 상황 하에 시나리오 선택에 의한 대안 순위의 영향을 덜 받기 위해서는 ODM보다 RDM을 의사결정 기법으로 사용하는 것이 더 유리한 결과를 얻을 것이다.

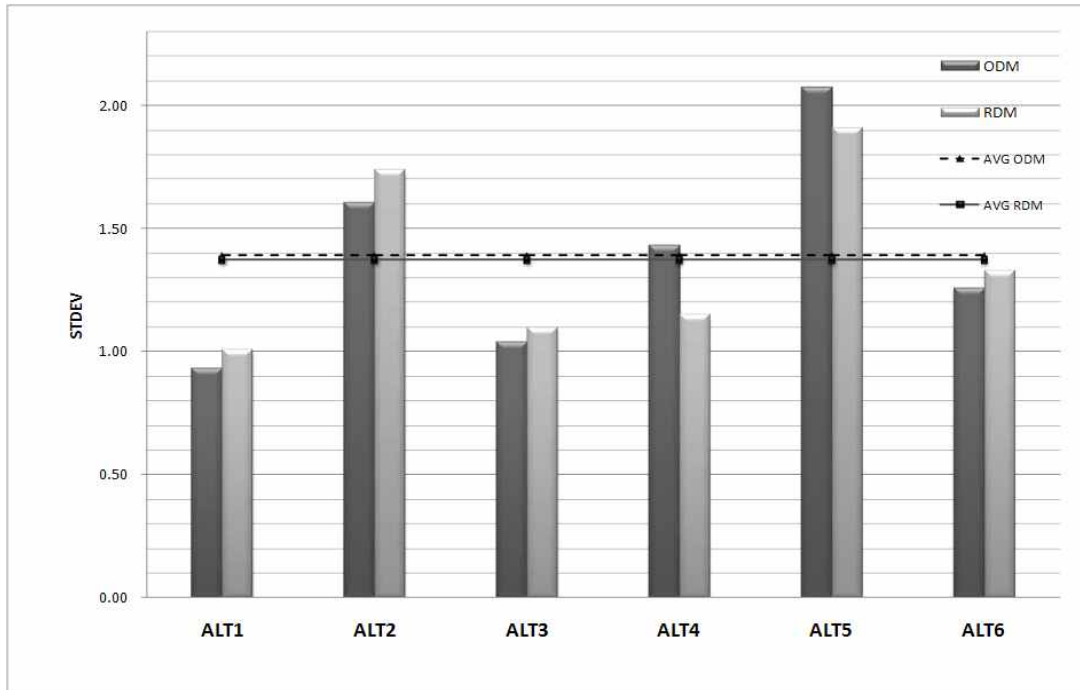


Figure 6.10 Standard deviation of ranks in cases when selecting 5 scenarios in 25 scenarios

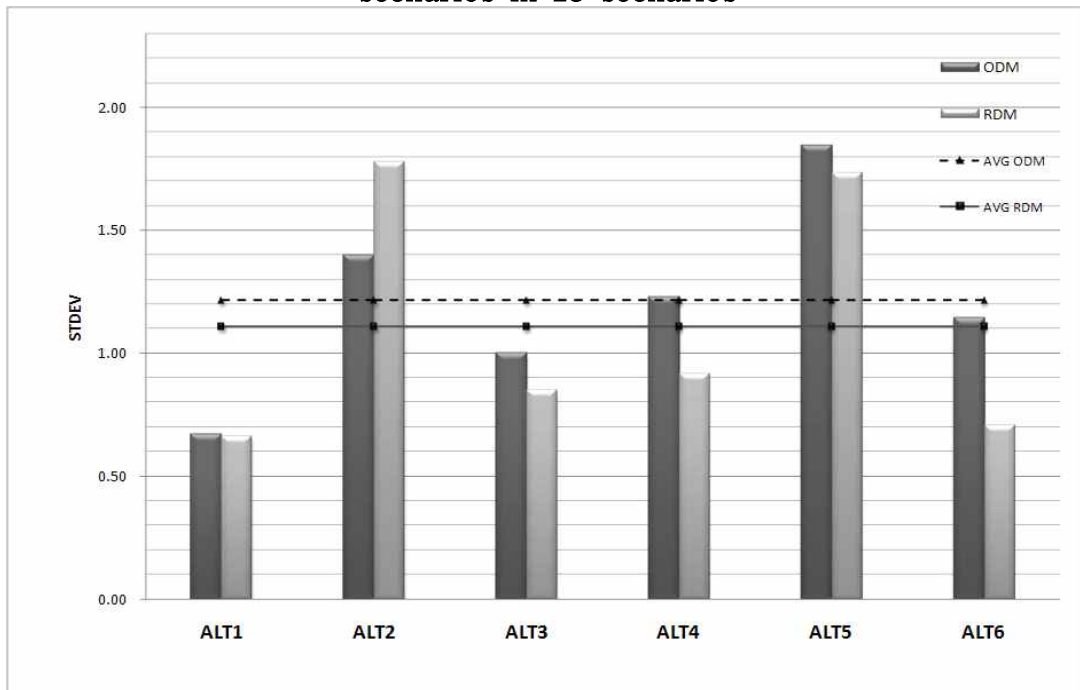


Figure 6.11 Standard deviation of ranks in cases when selecting 10 scenarios in 25 scenarios

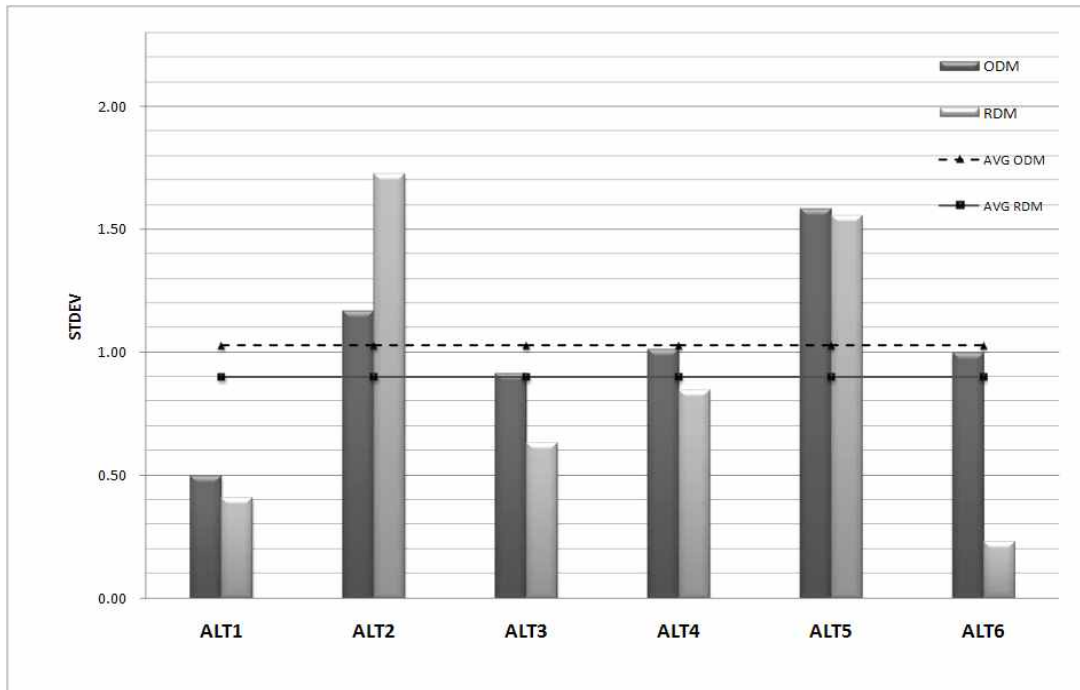


Figure 6.12 Standard deviation of ranks in cases when selecting 15 scenarios in 25 scenarios

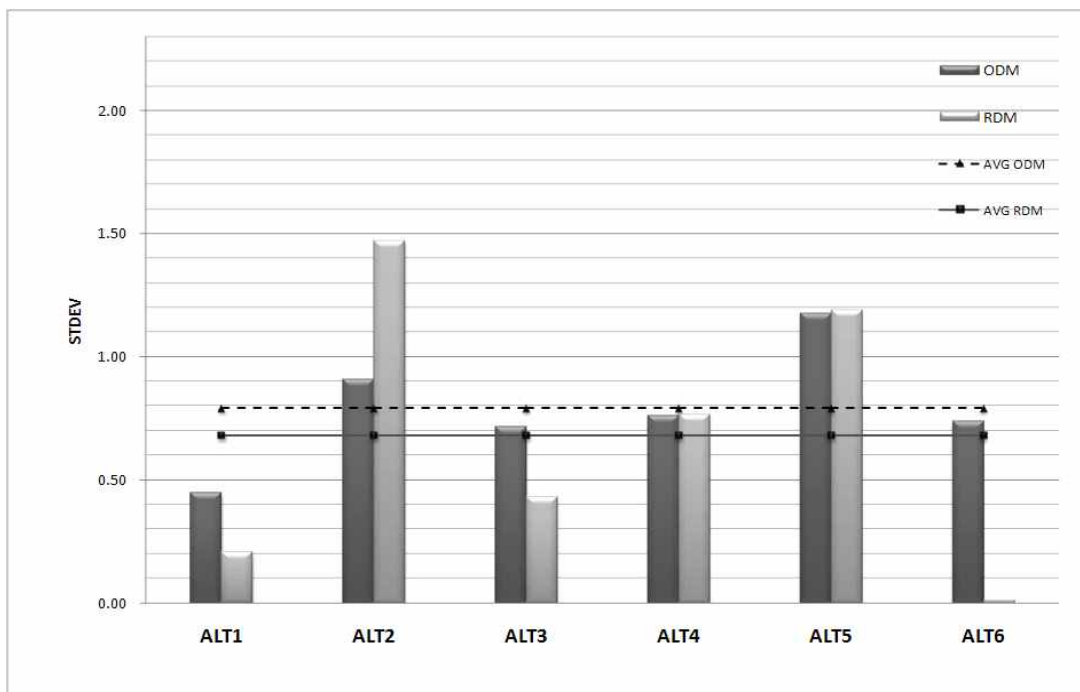


Figure 6.13 Standard deviation of ranks in cases when selecting 20 scenarios in 25 scenarios

제 7 장 결론 및 향후연구

7.1 요약 및 결론

본 연구는 기후변화를 실제적인 수자원계획에 반영하여 기후변화 적응이 이루어질 수 있도록 새로운 의사결정 기법인 로버스트 의사결정을 용수 공급계획에 적용하고 그 특성을 분석하였다. 먼저 기후변화를 고려한 의사결정 기법에 연루되는 불확실성을 분석하여 UKCIP(2003)을 기반으로 유형별로 조사한 후, 기후변화에 적절한 방법으로써 로버스트 의사결정을 제시한다. UKCIP(2003)은 특정 사상의 발생확률에 관한 지식과 그 사상의 결과나 영향에 대한 지식의 두 축으로 불확실성을 네 가지 종류로 구분한 후, 기후변화를 두 축 모두에서 지식의 정도가 낮은 무지의 불확실성으로 구분하였다. 이를 기반으로 본 연구는 특정 사상의 발생확률에 관한 지식이 정도가 낮은 상태 즉, 미래 시나리오의 확률에 대한 정보가 부족한 deep 불확실성에 중점을 두어 로버스트 의사결정의 타당성을 뒷받침하였다.

기존의 일반적인 의사결정 기법인 최적의사 결정과 로버스트 의사결정의 비교를 위해 적용대상으로 안동댐과 임하댐의 저수지 운영능력 증진을 위해 댐의 이수용량이 증대되도록 수위를 가상적으로 조절하여 대안을 구축하였다. 각 대안에 대해 A1B, A2, B2 배출시나리오와 12개의 GCMs으로 작성된 25개의 미래 기상 시나리오를 반영하였고 용수공급량, 용수공급 신뢰도, 여수로 방류량, 여수로비방류 신뢰도의 네 가지 성능인자로 용수공급 능력의 효과를 평가하였다. 시나리오-대안 별 구성된 네 가지 성능인자의 결과를 ‘최적 의사결정(ODM)’과 ‘로버스트 의사결정(RDM)’으로 대안의 순위를 산정하여 그 차이를 비교하였고 더 나아가 기후변화의 시나리오 선택 시 RDM의 효과를 분석하였다. 대안의 순위를 비교한 결과, 동일한 미래 시나리오들을 사용했음에도 불구하고 두

기법 간에 대안 별 순위가 6순위 중 평균 0.33 ~ 1.33 순위 차이가 발생하는 것을 확인하였다. 이를 통해 일반적인 의사결정인 최적 의사결정과 로버스트 의사결정이 동일한 대안과 시나리오를 사용했음에도 불구하고 대안 순위의 결과가 달라지는 것을 알 수 있다.

기후변화 하의 상황에서 RDM의 효과를 살펴보기 위해 다양한 기상 시나리오 중 몇 개의 시나리오를 채택하는 상황을 가정하여 RDM과 ODM 중 어떤 기법이 시나리오 선택에 의한 영향을 덜 받는지에 관해 연구를 설계하여 알아보았다. 이를 위해 사례 적용에서 사용하였던 25개의 시나리오 중 5, 10, 15, 20개 시나리오를 선택할 시 가능할 법한 시나리오 조합의 case를 생성하였고, ODM과 RDM을 사용하여 용수공급량에 대하여 성능인자를 산정한 뒤 각 대안의 순위 변동을 표준편차를 이용하여 산정하였다. 그 결과 대부분의 대안에서 시나리오 각 선택 case 대한 순위의 표준편차는 RDM의 경우가 최적 의사결정보다 평균적으로 약 0.02에서 0.11정도 더 작은 결과를 보였다. 이것은 기후변화와 같이 미래 시나리오의 확률에 대한 정보가 부족한 상황 하에 특정 시나리오를 선택하여 대안을 평가해야 할 시 어떤 시나리오를 선택하느냐에 따른 순위의 영향이 RDM을 사용할 경우가 ODM보다 작다는 것으로 해석될 수 있다.

7.2 고찰 및 향후연구

본 연구는 수자원 분야에서 기후변화 적응에 대한 연구가 미비한 가운데 처음으로 기후변화에 적합한 의사결정 기법 연구를 시도하였다는 것에 그 의의가 있다. 또한 RAND(2003)에서 제시한 RDM의 개념을 도입하여 일반적으로 사용했던 기후변화 시나리오의 확률에 대한 정보를 불확실하다고 간주하고 다양한 시나리오를 사용하여 최대손실이 적은 보수적인 대안을 찾는 접근이 주목할 점이라고 볼 수 있다.

사실상 본 연구는 RAND(2003)에서 제시한 RDM의 전 과정에서 살

펴보았을 때 몇 가지의 한계점을 가정하고 시작하였다. UKCIP에서 분류한 기후변화의 특성 중 deep 불확실성에만 초점을 맞추어 후회도 인자를 사용해 보수적인 대안을 채택하는 것에 집중하였고 시나리오 발생 결과의 불확실성에 연루되어 있는 시나리오를 구성하는 불확실성의 요소는 배제하였다. 따라서 추후에는 기후변화 두 불확실성을 함께 고려하기 위해 적응 과정(adaptive process)을 도입해 보다 안정적인 대안을 찾을 수 있는 연구가 이루어져야 할 것이다.

더 나아가 본 연구는 사례를 작성하고 적용한 부문에서도 몇 가지 개선되어야 할 점이 존재한다. 첫째, 용수공급계획 외에 시설 설계나 사업성 검토 부문에서 RDM을 검토해야 할 것이다. 본 연구는 RDM을 적용하기 위한 사례로 용수공급계획에 대해서만 대안을 작성하고 평가하였지만 다른 부문에서는 의사결정 기법에 따라 다른 결과가 도출될 가능성이 존재한다. 따라서 수자원 부문에서 이루어지는 다양한 예비 타당성 분야에 본 기법을 적용하여 그 효과를 분석해 보아야 할 것이다. 둘째, 대안 평가의 목적과 의사결정자의 관점을 고려한 로버스트 인자를 선정하여 안정적 대안을 추출한다. 본 연구에서는 기후변화의 최대손실을 회피하기 위하여 후회도를 산정해 보수적인 대안을 채택하였지만 사업의 목적과 관점에 따라 보다 다양한 로버스트 인자를 설정할 수 있을 것이다. 셋째, 가중치를 부여한 시나리오에 의한 ODM 순위와 RDM의 순위와는 어떠한 관련성이 있는지 알아본다. 본 연구는 ODM을 적용할 시 모든 시나리오에 동일한 확률을 부여한 평균값을 이용하였는데, 추후에는 시나리오에 가중치를 적용해 ODM과 RDM의 순위를 비교하여 시나리오에 부여되는 확률에 따라 ODM과 RDM의 순위차이가 어떻게 변화하는지 다루어져야 할 것이다.

참 고 문 헌

- 건설교통부 (2003). **수자원 관리와 의사결정방법**, 건설교통부.
- 건설교통부 (2004). **낙동강 유역조사 제 2권-1 기본현황조사 보고서**, 건설교통부.
- 고재경, 최충익, 김희선, 좌승희 (2008). **기후변화에 대한 지방자치단체의 적응방안 연구**, 경기개발연구원.
- 김영오, 서용원 (2000). “선진국의 기후변화 연구동향(Ⅱ) - 수자원관리에 대한 영향을 중심으로 -”, **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제33권, 제3호, pp. 32-41.
- 류재욱 (2010). 병렬저수지 연계에 의한 하류부 홍수량 저감분석, 석사학위논문, 영남대학교.
- 박경신 (2009). 기후 및 토지이용변화 시나리오를 고려한 유역통합관리 대안의 효과 분석, 석사학위논문, 서울대학교.
- 박준형 (2012). 안동-임하댐 연계운영을 통한 미래 기후변화 대응, 석사학위논문, 서울대학교.
- 변성호, 김태웅 (2007). “치수사업 및 유역종합치수계획을 위한 의사결정기법의 소개.”, **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제40권, 제9호, pp. 53-60.
- 서승범 (2011). 기후변화를 고려한 물수급 전망기법의 개발 및 적용, 석사학위논문, 서울대학교.
- 성진영 (2010). 기후변화를 고려한 수자원 유역평가지수의 개발, 석사학위논문, 서울대학교.
- 심명필 (2000a). “수자원사업 예비타당성조사의 방법론과 지침연구.”, **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제33권, 제1호, pp. 447-452.
- 심명필 (2000b). “수자원 경제성분석 입문(1).”, **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제33권, 제3호, pp. 111-120.

- 심명필 (2000c). “수자원 경제성분석 입문(2).”, **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제33권, 제4호, pp. 87-93.
- 심명필 (2001a). “수자원 경제성분석 입문(9).”, **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제34권, 제5호, pp. 139-149.
- 심명필 (2001b). “수자원 경제성분석 입문(10).”, **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제34권, 제6호, pp. 75-83.
- 심명필, 최승안 (2006). “섬진강댐 재개발사업 타당성검증의 경제성 분석.”, **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제39권, 제1호, pp. 60-66.
- 여규동 (2011). 수자원사업 대안선정 및 투자우선순위결정을 위한 다기준의사결정모형 개발, 박사학위논문, 인하대학교.
- 여규동, 이충성, 김길호, 심명필 (2009). “대체비용법을 이용한 하천 수질 개선 산정.”, **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제42권, 제4호, pp. 343-353.
- 유재영, 김길호, 여규동, 심명필 (2008). “예비타당성조사 사례분석을 통한 수자원사업 타당성분석의 개선방향 설정.”, **한국수자원학회 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회, pp. 1545-1549.
- 윤국희 (2011). HEC-ResSIM을 이용한 저수지연계운영 효과 연구, 석사학위논문, 경북대학교.
- 윤용남 (2007). **수문학 기초와 응용**, 청문각.
- 이석원 (2004). “지방자치단체의 댐용수 수요함수.”, **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제37권, 제2호, pp. 66-73.
- 이충성 (2007). 유역치수계획 최적대안 결정을 위한 의사결정모형의 개발, 박사학위논문, 인하대학교.
- 이홍배, 이진춘 (2000). **Excel과 함께하는 경영과학**, 무역경영사.
- 정은성 (2007). 다기준 의사결정기법을 이용한 지속가능한 유역통합관리, 박사학위논문, 서울대학교.
- 최충익 (2011). “지방자치단체 기후변화 적응정책의 의사결정 과정과 함의.”, **한국행정학보**, 제45권, 제1호, pp. 256-274.

- 한국개발연구원 (1999). **예비타당성 조사수행을 위한 일반지침 연구**, 한국개발연구원.
- 한국개발연구원 (2003). **수자원[댐]부문사업의 예비타당성조사 표준지침 연구 제3판**, 한국개발연구원.
- 한국개발연구원 (2004). **예비타당성 조사 수행을 위한 일반지침 수정·보안 연구 제4판**, 한국개발연구원.
- 한국수자원공사 (2009). **댐 운영 실무편람**, 한국수자원공사.
- 한국수자원학회 (2005). **댐 설계 기준**, 건설교통부.
- 한화진 (2006). **기후변화 영향 평가 및 적응 시스템 구축 II**, 한국환경정책평가연구원.
- 한화진 (2007). **기후변화 영향 평가 및 적응 시스템 구축 III**, 한국환경정책평가연구원.
- 황준식 (2005). 기후변화 영향평가를 위한 월 무수지모형의 적용성 검토, 석사학위논문, 서울대학교.
- Arnell, N.W. (2010). “Adapting to climate change: An evolving research programme.” *Climatic Change*, Vol. 100, No. 1, pp. 107-111.
- Ascough, J.C., Maier, H.R., Ravalico, J.K., and Strudley, M.W. (2008). “Future research challenges for incorporation of uncertainty in environmental and ecological decision-making.” *Ecological Modelling*, Vol. 219, pp. 383-399.
- Cai, Y.P., Huang, G.H., Tan, Q., and Yang, Z.F. (2011). “An integrated approach for climate-change impact analysis and adaptation planning under multi-level uncertainties. part I: Methodology.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 15, pp. 2779-2790.
- Carter, T. R., M. Parry, H. Harasawa, and S. Nishioka (1994). *IPCC technical guidelines for assessing climate change impacts and adaptation*, Department of Geography, University College

London and the Centre for Global environmental Research Japan.

- Dessai, S. (2005). *Robust adaptation decisions amid climate change uncertainties*, University of East Anglia.
- Dessai, S. and Hulme, M. (2004). “Dose climate adaptation policy need probabilities?.” *Climate Policy*, Vol. 4.
- Dessai, S. and Hulme, M. (2007). “Assessing the robustness of adaptation decisions to climate change uncertainties: A case study on water resources management in the East of England.” *Global Environmental change*, Vol. 17, pp. 59–72.
- Dessai, S. and Sluijs J. (2007). *Uncertainty and climate change adaptation – a scoping study*, Netherlands Environmental Assessment Agency.
- Dessai, S. and Wilby, R. (2010). *How can developing country decision makers incorporate uncertainty about climate risks into existing planning and policymaking processes?*, World Resources Report.
- Feenstra, J. F., I. Burton, J. B. Smith, and R. S. J. Tol (1998). *Handbook on methods for climate change, impact assessment and adaptation strategies*, United nations environment programme and Institute for Environmental Studies.
- Groves, D.F. and Lempert, R.J. (2007). “A new analytic method for finding policy-relevant scenarios.” *Global Environmental Change*, Vol. 17, pp. 73–85.
- Guo, P., Huang, G.H., Ahu, H., and Wang, X.L. (2010). “A two-stage programming approach for water resources management under randomness and fuzziness.” *Environmental Modelling & Software*, Vol. 24, pp. 1573–1581.

- Hallegatte, S. (2009). "Strategies to adapt to an uncertain climate change." *Global Environmental Change*, Vol. 19, pp. 240–247.
- Harrison, K.W. (2006). "Two-stage decision-making under uncertainty and stochasticity: Bayesian programming." *Advances in Water Resources*, Vol. 30, pp. 641–664.
- Harrison, K.W. (2007). "Test application of Bayesian programming: Adaptive water quality management under uncertainty." *Advances in Water Resources*, Vol. 30, No. 3, pp. 606–662.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2003). *IPCC 3rd Assessment Report*, Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2007). *IPCC 4th Assessment Report*, Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Johnson, T.E. and Weaver, C.P. (2009). "A framework for assessing climate change impacts on water and watershed systems." *Environmental Management*, Vol. 43, pp. 118–134.
- Jones, R. N.(2001). "An environmental assessment/management framework for climate change impact assessments." *Natural Hazards*, Vol. 23, pp. 197–230.
- Lempert, R.J. and Collins, M.T. (2007). "Managing the risk of uncertain threshold responses: Comparison of robust, Optimum, and precautionary approaches." *Risk Analysis*, Vol. 27, No. 4, pp. 1009–1026.
- Lempert, R.J. and Groves, D.G. (2010). "Identifying and evaluating robust adaptive policy responses to climate change for water management agencies in the American West." *Technological Forecasting & Social Change*, Vol. 77, pp. 960–974.

- Lempert, R.J., Groves, D.F., Popper S.W., and Bankes, S.C. (2006). "A general, analytic method for generating robust strategies and narrative scenarios." *Management Science*, Vol. 52, No. 4, pp. 514–528.
- Lempert, R.J., Nakicenovic, n., Sarewitz, D., and Schlesinger, M. (2004). "Characterizing climate-change uncertainties for decision-makers." *Climatic Change*, Vol. 65, pp. 1–9.
- Li, Y.P., Huang, G.H., and Nie, S.L. (2010). "Planning water resources management systems using a fuzzy-boundary interval-stochastic programming method." *Advances in Water Resources*, Vol. 33, pp. 1105–1117.
- Mastrandrea, M.D. Heller, N.E. Root, T.L., and Schneider, S.H. (2010). "Bridging the gap: Linking climate-impact research with adaptation planning and management." *Climatic Change*, Vol. 100, No. 1, pp. 81–101.
- Parry, M., N. Arnell, M. Hulme, R. Nicholls, and M. Livermore (1998). "Adapting to the inevitable." *Nature*, Vol. 395, pp. 741–741.
- Polasky, S., Carpenter, S.R., Folke, C., and Keeler, B. (2011). "Decision-making under great uncertainty: Environmental management in an era of global change(Review)." *Trends in Ecology and Evolution*, Vol. 26, No. 8, pp. 398–404.
- Research and Development (2000). *Shaping the next one hundred years: New methods for quantitative, long-term policy analysis*, Research and Development.
- Research and Development (2008). *Preparing for an uncertain future climate in the inland empire: Identifying robust water-management strategies*, Research and Development.
- Semenov, M. A. and Stratonovitch, P. (2010). "Use of multi-model ensembles from global climate models for assessment of

- climate change impacts.” *Climate Research*, Vol. 41, pp. 1–14.
- Smith, J.B. (1997). “Setting priorities for adapting to climate change.” *Global Environmental Change*, Vol. 7, No. 3, pp. 251–264.
- Steinschneider S. and Brown C. (2012). “Dynamic reservoir management with real-option risk hedging as a robust adaptation to nonstationary climate.” *Water Resources Research*, Vol. 48, W05524.
- Toth, F. 2000. *Decision analysis frameworks (Guidance papers on the cross cutting issues of the third assessment report of the IPCC)*, Intergovernmental Panel on Climate Change.
- United Kingdom Climate Impacts Programme (2003). *Climate adaptation: risk, Uncertainty and decision-making*, United Kingdom Climate Impacts Programme.
- U.S. Army Corps of Engineers (2010). *Decision making under uncertainty*, U.S. Army Corps of Engineers.
- U.S. Army Corps of Engineers (2007). *HEC-ResSim reservoir system simulation user’s manual*, U.S. Army Corps of Engineers.
- United States Global Change Research Program (2009). *Best practice approached for characterizing, communicating, and incorporating scientific uncertainty in climate decision making*, United States Global Change Research Program.
- U.S. Geological Survey (2009). *Climate change and water resources management: A federal perspective*, U.S. Geological Survey.
- Waler, W.E., Harremoes, P., Rotmans, J., Sluijs, J.P., Asselt, M.B.A., Janssen, P., and Krauss, M.P. (2003). “Defining uncertainty: A conceptual basis for uncertainty management in model-based decision support.” *Integrated Assessment*, Vol. 4, No. 1, pp. 5–17.

- Wood, A.W., Lettenmaier, D.P., and Palmer, R.N. (1997). "Assessing climate change implications for water resources planning." *Climatic Change*, Vol. 37, pp. 203-228.
- Water Utility Climate Alliance (2010). *Decision support planning methods: Incorporating climate change uncertainties into water planning*, Water Utility Climate Alliance.

Abstract

Testing Applicability of Robust Decision Making for a Water Supply Planning Under Climate Change Uncertainty

Noel Kang

Department of Civil & Environmental Engineering

College of Engineering

Seoul National University

Research that addresses climate change response recommends mitigation or adaptation measures. Climate mitigation is defined as any action taken to permanently eliminate or reduce the long-term and hazards of climate change to human life and property. Climate adaptation refers to the ability of a system to adjust to climate change in order to modulate potential damage, to take advantage of opportunities, or to cope with the consequences. Climate mitigation and adaptation should not be seen as alternatives to each other, but rather as a combined set of actions in an overall strategy. However, existing research related to climate change in water resources tend to only concentrate on mitigation field, or rainfall forecasting and change assessment. In this condition, researches of climate change decision making is needed to realize adaptation planning.

Climate change is regarded as deep uncertainty which is defined as poor knowledge about probability of the future states in UKCIP (2003). Robust Decision Making (RDM) is a particular set of methods and tools developed over the last decade, primarily by researchers associated with the RAND Corporation, designed to support decision making and policy analysis under conditions of deep uncertainty. It is an iterative decision analytic framework that helps identify potential robust strategies, characterize the vulnerabilities of such strategies, and evaluate the tradeoffs among them.

In this context, this study tests applicability of RDM over Optimal

Decision Making (ODM) by comparing to the results for water supply planning in a Korean dam case. Both RDM and ODM were conducted for estimating same alternatives of Andongdam and Imhadam by simulating various futures states, 25 scenarios combining twelve GCMs with A1B, A2, and B1 emission scenarios which were used to estimate various performances indices. *abcd* hydrologic model was utilized to generate the inflow for each dams and *Hec-ResSim* as the reservoir operation model was used to estimate dam release. There are six alternatives which are set to increase dam effective storage for preparation during the drought period. As a result, the rank of alternatives between ODM and RDM method shows that average rank differences is $0.33 \sim 1.33$. Furthermore this study analyzes the effectiveness of RDM under climate change condition. Assuming cases in which a planner should choose 5, 10, 15, 20 scenarios in 25 scenarios, standard deviations of ranks with ODM and RDM are estimated. In the results, the standard deviation of ranks with RDM is less than with ODM. This means that the ranks with RDM is less effected by what scenarios to be selected than ODM.

Decision making under climate change uncertainty is proper to be dealt with 'Robust' rather than 'Optimal' because the climate change scenarios are vast and the knowledge of probability of event is very poor. In this context, the research tests applicability of RDM were compared to ODMs by applying the results to the water supply planning. The results show that there are rank differences between ODM and RDM even though both tests used the same scenarios and alternatives. In addition, RDM has efficiencies over ODM when required to determine some scenarios in existing scenarios. This study is significant in order to attempt a new decision making method for climate change in Korea.

Keywords: climate change adaptation, Robust Decision Making, uncertainty, water resources planning

Student Number: 2010-23301

감사의 글

어젯밤까지 눈이 빨개지도록 보고 또 보던 논문의 끝에 ‘감사의 글’이란 글자를 적고 보니 왠지 모르게 마음이 숙연해집니다. 2010년 겨울, 학부를 졸업하고 포항에서 바로 서울로 올라와 시작한 석사기를 되돌아보니 많은 분들로부터 은혜를 입고 여기까지 온 거 같습니다.

먼저 부족한 저를 받아주시고 지금까지 지도해주신 김영오 교수님께 감사의 마음을 전하고 싶습니다. 졸업을 앞두고 교수님께는 은근한 고집 있는 제자 때문에 흰 머리 하나 늘지는 않으셨을까하는 죄송한 마음도 있고 교수님이 갖고 계신 학식에 대해서 보다 적극적으로 묻지 못했던 아쉬움도 있습니다. 그럼에도 불구하고 학업의 기간 동안 때에 맞는 교수님의 격려와 진심어린 충고를 통해 석사과정을 무사히 마칠 수 있었습니다. 그리고 그 동안 수업과 조언을 통해 이끌어 주셨던, 한결같은 학문적 열의를 지니신 이길성 교수님과 빨간 중절모가 잘 어울리시는 인자한 서경덕 교수님, 늘 꼼꼼히 학생들을 챙겨주시는 세심한 서일원 교수님께도 가슴 깊이 감사드립니다.

수문학 연구실 선후배님! 진심으로 고맙습니다. 연구실의 큰 기둥 재경오빠, 연구실의 달콤함을 맡은 태호오빠, 외롭고 쓸쓸한 연구의 길에 햇살 같은 치명적 존재감 준형이, 다운 펌 동기 경태오빠, 라블리한 초롱언니, 바바리안 수웅이, 드립전사 귀요미 영이, 목이 아픈 영호, 밝고 예쁜 Atashi, 소년 용원박사님, 진정한 능력자 가림언니 덕분에 힘을 내고 여기까지 올 수 있었던 것 같습니다. 그리고 같은 건물 안에서 바쁜 와중에도 오가며 안부를 묻고 챙겨주었던 다른 연구실 선후배님들과 논문을 도와주셨던 은성선배님, 종종 뵈었던 수문학 연구실 졸업생과 파트 선배님들께도 감사드린다 말하고 싶습니다.

마지막으로 든든한 나의 친오빠와 새언니, 그리고 지금도 저를 보면 물가에 내놓은 아이 같다며 늘 염려가 많으신 부모님께 이 논문을 드리고 싶습니다. 저의 공부하는 모습에 자신은 대단치 않은데 딸은 대단한 거 같다며 신기해하던 우리 엄마, 엄마가 없었다면 딸은 여기까지 절대 올 수 없었을 거라고 감사하는 마음 전하고 싶습니다. 그리고 멀리서 가족위해 고생하시는 우리 아빠, 아빠 덕분에 이렇게 공부할 수 있었다고 사랑한다고 말씀드리고 싶습니다.

2012년 8월 1일
뉴질랜드 크라이스트 처치에서